

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTTO MOTORLARINDA KİSMİ YÜK ŞARTLARINDA EK YAKIT
OLARAK HİDROJEN KULLANIMININ EMİSYONLAR VE
PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

ERMAN GENÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. TARKAN SANDALCI**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTTO MOTORLARINDA KISMİ YÜK ŞARTLARINDA EK YAKIT
OLARAK HİDROJEN KULLANIMININ EMİSYONLAR VE
PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Erman GENÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 03.08.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Tarkan SANDALCI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. İrfan YAVAŞLIOL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Metin ERGENEMAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Tarkan SANDALCI
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu bitirme tezine ve bu bitirme tezi için yapılan araştırma, hesaplama ve uygulama çalışmalarına verdiği destekler, sağladığı kaynaklar, harcadığı değerli vakitler ve samimi tavsiyelerinden ötürü Makine Mühendisliği Bölümü Otomotiv Anabilim Dalı'nda öğretim üyesi ve bu tezin tez danışmanı olan Yrd. Doç. Dr. Tarkan Sandalcı'ya ve yapılan uygulama çalışmalarına verdiği destekten ötürü Arş. Gör. Yasin Karagöz'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2011

Erman GENÇ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
2.2 Tezin Amacı.....	4
2.3 Hipotez.....	4
BÖLÜM 2	
HİDROJEN.....	5
2.1 Hidrojen Enerjisi.....	6
2.2 Hidrojen Üretimi.....	6
2.2.1 Yakıt Zenginleştirme Amaçlı Hidrojen Üretim Yöntemleri ve Önceki Çalışmalar	8
2.3 Hidrojenin Depolanması	14
2.4 Hidrojenin Taşınması.....	16
2.5 Hidrojen Enerjisi Teknolojisinin Dünyadaki Gelişimi	16
BÖLÜM 3	
HİDROJEN YAKITININ GENEL ÖZELLİKLERİ	19
BÖLÜM 4	
HİDROJENİN YAKIT OLARAK KULLANILMASI	22
4.1 Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılması.....	22

4.2	Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılmasının Avantaj ve Dezavantajları	25	
4.3	İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojen Kullanımının Ortaya Çıkardığı İşletim Problemleri.....	29	
BÖLÜM 5			
İÇTEN YANMALI MOTORLARDA HİDROJEN KULLANILMASI KONUSUNDA ÖNCEDEN YAPILAN ÇALIŞMALAR.....			31
BÖLÜM 6			
UYGULAMA			40
9.1	Giriş	40	
9.2	Deney Seti ve Deneyin Yapılışı.....	41	
9.3	Deney Sonuçları.....	45	
6.3.1	Güç Kaynağı ile Rölanti Devrinde Yapılan Deneylerin Sonuçları..	45	
6.3.2	Alternatör ile Rölanti, %25 ve %50 Kısmi Yükte Yapılan Deneylerin Sonuçları	50	
BÖLÜM 7			
SONUÇLAR ve ÖNERİLER			69
KAYNAKLAR			71
ÖZGEÇMİŞ			74

SİMGE LİSTESİ

Ar	Argon
be	Özgül yakıt tüketimi
Bh	Birim zamanda tüketilen yakıt miktarı
CH ₄	Metan
C _n H _m	Hidrokarbonların genel kimyasal formülü
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
F	Kuvvet
H ₂ O	Su
H ₂ S	Hidrojen Sülfid
HC	Hidrokarbon
Hu	Yakıtın alt ısıl değeri
KOH	Potasyum hidroksit
N	Azot
NaBH ₄	Sodyum Borhidrür
NaBO ₂	Sodyum Metaborat
NO	Azot oksit
NO _x	Azot oksitlerin genel kimyasal formülü
O	Oksijen
O ₂	İki atomlu oksijen
O ₃	Ozon
SO ₂	Kükürt dioksit
SO _x	Kükürt oksitlerin genel kimyasal formülü
t	Zaman
λ	Yakıt-hava karışımının hava fazlalık katsayısı, hava/yakıt oranı, lambda
φ	Hava fazlalık katsayısının tersi, yakıt eşdeğerlik oranı

KISALTMA LİSTESİ

AÖN	Alt Ölü Nokta
AQEG	Air Quality Expert Group
AT	Avrupa Topluluğu
BMW	Bayerische Motoren Werke
BP	British Petroleum
CFD	Computational Fluid Dynamics
DDA	Digital Differential Analyzer
ECU	Engine Control Unit
EGR	Egzoz Gazı Resirkülasyonu
H ₂ İYM	Hidrojen (H ₂) yakıtlı İçten Yanmalı Motor
İYM	İçten Yanmalı Motor
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MAN	Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg
MBT	Maximum Brake Torque
NETCEN	National Environmental Technology Centre
PWM	Pulse Width Modulation
SCR	Selective Catalytic Reduction
ÜÖN	Üst Ölü Nokta
VVT	Variable Valve Timing
WE-NET	World Energy Network

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Düşük akımlı plazmatron yakıt dönüştürücüsü..... 9
Şekil 2.2	Elektroliz için güç gereksinimi ve hidrojen eklenmesi ile motordan alınan güç (Windsor Üniversitesi) 10
Şekil 2.3	Kocaeli Üniversitesi'ndeki elektroliz ünitesi 11
Şekil 2.4	US Patent: 4,081,656'dan Yull Brown'ın elektroliz ünitesi 13
Şekil 2.5	Arktan geçen hidrojen 13
Şekil 2.6	Bir hidrojen yakıtı istasyonu (SHELL'in HYDROGEN istasyonu)..... 17
Şekil 4.1	Hidrojenle çalışan 1965 model bir Cobra replikası..... 23
Şekil 5.1	Jacob Wall'un örnek düzeneği 33
Şekil 6.1	Deney düzeneğinin şematik diyagramı 43
Şekil 6.2	Deney düzeneğinin bir görüntüsü 44
Şekil 6.3	Deney düzeneğinin bir görüntüsü 44
Şekil 6.4	PWM ünitesi ve elemanları 45
Şekil 6.5	Güç kaynağı kullanılarak rölantide karbon monoksit grafiği 47
Şekil 6.6	Güç kaynağı kullanılarak rölantide karbon dioksit grafiği 47
Şekil 6.7	Güç kaynağı kullanılarak rölantide güç grafiği..... 48
Şekil 6.8	Güç kaynağı kullanılarak rölantide hidrokarbon grafiği..... 48
Şekil 6.9	Güç kaynağı kullanılarak rölantide azot oksit grafiği 49
Şekil 6.10	Güç kaynağı kullanılarak rölantide özgül yakıt tüketimi grafiği 49
Şekil 6.11	Güç kaynağı kullanılarak rölantide moment grafiği 50
Şekil 6.12	Alternatör kullanılarak rölantide karbon monoksit grafiği 58
Şekil 6.13	Alternatör kullanılarak %25 yükte karbon monoksit grafiği 58
Şekil 6.14	Alternatör kullanılarak %50 yükte karbon monoksit grafiği 59
Şekil 6.15	Alternatör kullanılarak rölantide karbon dioksit grafiği 59
Şekil 6.16	Alternatör kullanılarak %25 yükte karbon dioksit grafiği 60
Şekil 6.17	Alternatör kullanılarak %50 yükte karbon dioksit grafiği 60
Şekil 6.18	Alternatör kullanılarak rölantide güç grafiği..... 61
Şekil 6.19	Alternatör kullanılarak %25 yükte güç grafiği..... 61
Şekil 6.20	Alternatör kullanılarak %50 yükte güç grafiği..... 62
Şekil 6.21	Alternatör kullanılarak rölantide hidrokarbon grafiği..... 62
Şekil 6.22	Alternatör kullanılarak %25 yükte hidrokarbon grafiği..... 63
Şekil 6.23	Alternatör kullanılarak %50 yükte hidrokarbon grafiği..... 63
Şekil 6.24	Alternatör kullanılarak rölantide azot oksit grafiği 64
Şekil 6.25	Alternatör kullanılarak %25 yükte azot oksit grafiği 64
Şekil 6.26	Alternatör kullanılarak %50 yükte azot oksit grafiği..... 65
Şekil 6.27	Alternatör kullanılarak rölantide özgül yakıt tüketimi grafiği 65
Şekil 6.28	Alternatör kullanılarak %25 yükte özgül yakıt tüketimi grafiği 66
Şekil 6.29	Alternatör kullanılarak %50 yükte özgül yakıt tüketimi grafiği 66
Şekil 6.30	Alternatör kullanılarak rölantide moment grafiği 67

Şekil 6.31	Alternatör kullanılarak %25 yükte moment grafiği	67
Şekil 6.32	Alternatör kullanılarak %50 yükte moment grafiği	68

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Düşük akımlı bir plazmatron yakıt dönüştürücüsünün tipik çalışma parametreleri 8
Çizelge 2.2	Kocaeli Üniversitesi elektroliz ünitesi teknik özellikleri 11
Çizelge 2.3	Kocaeli Üniversitesi elektroliz testi sonuçları..... 12
Çizelge 3.1	Hidrojen, benzin ve metanın yakıt özellikleri 20
Çizelge 3.2	Hidrojen ve benzinin yanma özellikleri 20
Çizelge 4.1	Hidrojen taşıtlarına genel bakış..... 24
Çizelge 6.1	Deney motorunun özellikleri..... 42
Çizelge 6.2	Güç kaynağı ile rölanti devrinde deney sonuçları..... 46
Çizelge 6.3	Alternatör ile rölanti devrinde deney sonuçları..... 51
Çizelge 6.4	Alternatör ile %25 kısmi yükte 1. deney sonuçları 52
Çizelge 6.5	Alternatör ile %25 kısmi yükte 2. deney sonuçları 53
Çizelge 6.6	Alternatör ile %25 kısmi yükte 3. deney sonuçları 54
Çizelge 6.7	Alternatör ile %50 kısmi yükte 1. deney sonuçları 55
Çizelge 6.8	Alternatör ile %50 kısmi yükte 2. deney sonuçları 56
Çizelge 6.9	Alternatör ile %50 kısmi yükte 3. deney sonuçları 57

OTTO MOTORLARINDA KISMİ YÜK ŞARTLARINDA EK YAKIT OLARAK HİDROJEN KULLANIMININ EMİSYONLAR VE PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Erman GENÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Tarkan SANDALCI

Bu çalışma Makine Mühendisliği Enerji Yüksek Lisans Programı Bitirme Tezi olarak yapılmıştır. Bu tez günümüzde alternatif bir yakıt olarak ön plana çıkan hidrojen ve hidrojen katkılı fosil yakıtların incelenmesi ve bir deney motoru üzerinde hidrojenin ek yakıt olarak benzinle beraber kullanılmasının motor emisyon ve performansına etkilerinin deneysel olarak irdelenmesi ve analiz edilmesi üzerine yapılmış bir araştırma ve uygulama tezidir.

Bu tez çalışmasında ilk olarak hidrojenin yakıt olarak özellikleri hakkında kısa bir bilgi verilerek neden alternatif bir yakıt olarak ön plana çıktığı açıklanmaya çalışılmıştır. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanım alanları ve uygulamaları hakkında örneklerden bahsedilmiştir. Sonraki kısımda ise hidrojenin ek yakıt olarak kullanılmasının avantaj ve dezavantajları üzerinde durulmuştur ve bunu takiben bu konuda önceden yapılmış çalışmalardan örnekler verilmiştir. Uygulama kısmında ise kullanılan içten yanmalı motorun özelliklerinden ve deney düzeneğinden kısaca bahsedildikten sonra deneyin uygulanış aşamaları anlatılmıştır. Hidrojen içten yanmalı motora ek yakıt olarak sırasıyla rölanti ve kısmi yük şartlarında gönderilerek deneylerin gerçekleştirilmesi sonucu emisyon ve performans verilerinin toplanması ve verilerin irdelenmesi üzerinde durulmuştur. Hidrojenin üretimi motor dışı bir güç kaynağı ve motorun alternatörü ayrı ayrı deneylerde kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu iki kaynağın uygulamalara etkisi incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Daha sonra veriler bilgisayarda saklanmış ve “MICROSOFT EXCEL” programında kullanılarak grafiklere dökülmüştür. Grafiklerdeki veriler ışığında ek yakıt hidrojenin rölanti ve kısmi yük şartlarında kullanımı sonucu ortaya çıkan emisyonlar ve elde edilen performans değerlerinden sonuçlar çıkarılmıştır. Kısacası bu tez çalışmasında içten yanmalı motorlarda ek yakıt olarak hidrojenin kullanılmasının ortaya çıkardığı emisyon ve performans değerleri deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, iten yanmalı motor, emisyon, performans, alternatif yakıt.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF USING HYDROGEN AS SUPPLEMENTARY FUEL IN OTTO ENGINES UNDER PARTIAL LOAD CONDITIONS ON EMISSIONS AND PERFORMANCE

Erman GENÇ

Department of Mechanical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Asst. Prof. Dr. Tarkan SANDALCI

This study was conducted as a Mechanical Engineering Energy Master's Degree thesis. This thesis is an research and experimental thesis which was made to study hydrogen and hydrogen added fuels which are gaining importance in today's world as alternative fuel solutions and to experimentally study and analyze the effects of using hydrogen as supplementary fuel with gasoline in a test engine on engine performance and emissions.

In this thesis first of all basic information on hydrogen as a fuel was given and its importance as an alternative fuel was explained. Hydrogen's areas of use and applications in internal combustion engines were explained with examples. Advantages and disadvantages of using hydrogen as a supplementary fuel were inspected and studies made on this topic previously were given as examples for comparison. In the experiment part of the thesis, test setup and the internal combustion engine used in the experimentation were introduced and after these, experiment was explained step by step. Experiments were done by introducing hydrogen into the engine as a supplementary fuel at idle and partial load conditions and afterwards data on emissions and performance were collected and studied. Production of hydrogen was conducted by using an external power source and engine's alternator on seperate experiments and effect of these two sources to experiments were inspected and compared to each other. Later on the collected data was stored in digital environment and graphs were drawn out of the data by using the software 'MICROSOFT EXCEL'. Conclusions were made on the data collected on emissions and performance with the help of these graphs. In short, in this thesis effects of using hydrogen as a supplementary fuel in internal combustion engines on emissions and performance were experimentally taken into study and the results were evaluated.

Keywords: Hydrogen, internal combustion engine, emission, performance, alternative fuel.

1.1 Literatür Özeti

Fosil kökenli yakıtların teknolojinin gelişmesi ve aşırı kullanım sonucu hızla tükenmesi, araştırmacıları alternatif yakıt arayışına itmiştir. Sudan elde edilebilirliği sayesinde sonsuz bir enerji kaynağı olan hidrojen günümüz teknolojisi ile motorlu taşıtlarda yakıt olarak kullanılabilme sınırına gelmiştir. Hidrojenin çevre dostu olması ve geleneksel yakıtlara göre avantajlarının bulunması, yakın gelecekte en gözde enerji kaynağı olmasını sağlamaktadır. Bir takım işletim problemleri bulursa da yapılacak çalışmalarla bu problemler giderilebilir.

Çevre kirliliğine sebep olan önemli etkenlerden birisi de içten yanmalı motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarıdır. Fosil kaynaklı yakıtların aşırı kullanımı sonucu azalması ve artan çevre kirliliği, çevre bilincine uygun ve yenilenebilir alternatif yakıtların araştırılmasını gündeme getirmiştir. Araştırılacak alternatif yakıtın içten yanmalı motorun performansını fazla düşürmemesi ve egzoz emisyonlarını olumlu yönde etkilemesi gerekmektedir. Ayrıca bu yakıtın elde edilebilirliği, maliyetinin düşük olması, kullanılabilirliği, bulunabilirliği ve motorda fazla değişiklik gerektirmeden kullanılması da önem taşımaktadır.

İklim değişiklikleri tarafından oluşturulan tehdit ve enerji kaynaklarının güvenliği için verilen uğraş bugünlerde politik gündem oluşturmaktadır. Hükümetler; modal değişimler gerçekleştirmek, karbonu yakıtlardan çıkarmak ve ana enerji kullanımını azaltmak için stratejik planları harekete geçirmektedirler.

Bu stratejik planlar arasında dikkat çekici bir yeri, geleceğin enerji taşıyıcısı olarak hidrojen almaktadır. Bazı üreticiler yakıt pilli taşıtların yanısıra hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlar (H₂İYM'lar) kullanan prototip taşıtlarını da tüketicilere tanıtmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkeler yerel kirlenmeyi karşılanabilir bir maliyetle azaltmak için yolcu taşıtları ve

otobüslerin yanısıra iki ya da üç tekerli araçları da çalıştıran H₂İYM'lar konusunda atılım yapmaktadır.

Enerji kaynakları, yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

Yenilenemeyen enerji kaynakları arasında; kömür, petrol ve petrol ürünleri, doğalgaz ve nükleer enerji gösterilebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarında ise biyokütle (odun, bitki artıkları vb.), rüzgâr, hidrolik, jeotermal ve güneş enerjisi ön sıralarda yer almaktadır. Dünyada büyük ölçüde yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanılıyor olması, çevre sorunlarını önemli ölçüde artırmıştır. Bu nedenle çevresel etkileri az olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneliş her bakımdan avantajlı olmaktadır. Ancak bazı teknik sorunların çözümlenebilmesi için zamana ihtiyaç vardır ve bu da söz konusu geçişin oldukça uzun bir süre alacağını göstermektedir.

Hidrojen, metanol (metil alkol), etanol (etil alkol), LPG, çeşitli bitkisel yağlar gibi alternatif yakıt türleri taşıtlarda kullanılmış ve bazıları halen kullanılmaktadır. Bu kaynakların kullanılmasında bazı olumsuzluklar yaşanmış ve halen geliştirilmelerine devam edilmektedir. Örneğin hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında depolama problemleri ortaya çıkmıştır. Hidrojenin basınçlı gaz olarak veya metal hidrit olarak depolanması için yüksek hacim problemi varken, sıvı olarak depolanması için de yüksek maliyet ve buharlaşma kayıpları gibi problemler söz konusu olmaktadır.

Fosil yakıtları esas alan enerji kullanımı; yakıt konusunda dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri ve çevre sorunları gibi önemli olumsuzlukların yanında, dünya fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini arttırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, mevcut teknik ve ekonomik sorunlarının çözümlenmesi halinde 21. yüzyılın en önemli enerji kaynağı olacağı kabul edilmektedir [1].

Genel olarak enerjiye ve bunun paralelinde fosil yakıtlara olan talep gelişmeye ve artan nüfusa paralel olarak artmaktadır. Arz-talep dengesindeki açığın giderek artması dışında, fosil kaynaklardan elde edilen sıvı ve gaz yakıtların doğrudan yakılarak tüketilmeleri sonucunda çok ciddi çevre sorunları da ortaya çıkmaktadır. Örneğin, atmosferde normalde 180-280 ppm arasında değişen CO₂ seviyesi, 2002 yılında 370 ppm seviyesine ulaşmış bulunmaktadır. Dünyanın fosil yakıt kullanımından dolayı CO₂ emisyonunda 1962-2002 yılları içinde 4 kat artış meydana gelmiştir. 1982-2002 yılları arasında atmosferik CO₂ konsantrasyonunda %30 mertebesinde bir artış olduğu ve bunun da sera etkisi yaparak dünya sıcaklığının 0.5 derece artmasına neden olduğu iddia edilmektedir. Artan nüfus ve buna bağlı olarak yükselen enerji

talebi göz önüne alınarak yapılan hesaplarda CO₂ emisyonunun azaltılamaması halinde bunun atmosferdeki konsantrasyonunun 2100'de 700 ppm'e ulaşacağı hesaplanmaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların yakılarak tüketilmesi sonucunda ortaya çıkan diğer önemli bir çevresel sorun da kükürt ve azot oksitlerin artışıdır [2].

Yüksek verim, çevre sorunları ve fosil yakıt rezervlerinin azalması gibi nedenler 21.yy enerji tercihinin elektrik ve hidrojenen yana olması sonucunu doğurmaktadır. Bu iki alternatif yakıt birbirine dönüştürülebilmektedir. Ayrıca hidrojen elektrikten daha iyi depolanabilmekte ve uzun mesafelere taşınabilmektedir. Bu özelliği hidrojenin uçaklar ve motorlu taşıtlar içinde yakıt olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır.

Elektroliz ile sudan elde edilebilmesi, fiziksel ve kimyasal özellikleri, benzine göre kütleli enerji yoğunluğunun daha yüksek olması ve çevreye olumlu etkileri hidrojeni önemli bir alternatif yakıt durumuna getirmektedir. Motor yakıtı olarak hidrojen kullanımı 1920'li yıllarda başlamış ve günümüze kadar yapılan çalışmalarla hidrojen kullanım sınırına ulaşmıştır. Uygulamanın yaygınlaştırılmasının önündeki engeller; ekonomik faktörler ve mevcut enerji sistemleri ile geleneksel motorların çağın gerisinde kalmasının getirebileceği sakıncalardır. Ancak çevresel koşullar bir an önce kullanımın başlamasını zorunlu kılmaktadır.

Artan dünya nüfusu ve ekonomik gelişmeler enerji talebini hızla artırmaktadır. Günümüzün başlıca etkin enerji kaynaklarını kömür, fosil yakıtlar ve doğal gaz, nükleer enerji ve hidrolik enerji oluşturmaktadır. Dünya üzerinde, endüstride ve konutlarda gerekli olan ısının üretimi, taşıt motorlarının ve stasyon motorlarının güç üretimi aydınlatma ve iletişim amaçları için enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkelerin enerji gereksinimi ise genelde, uygarlık düzeyi ve yaşam standartları, kullanılan teknolojinin seviyesi, iklim şartları vb. ile bağıntılı olarak değişmektedir. Hidrojen gelecek dönemlerin en etkin kullanıma sahip enerji sektörü olmaktadır. Sudan elde edilerek, kullanımı sonucu tekrar suya dönüşüm özelliği ile hidrojen, "yenilenebilir enerji" kaynağıdır. Çünkü hidrojenin hava ile yanması sonucu oluşan yanma ürünü tekrar hidrojen üretiminde kullanılabilir olan su buharıdır. Böylece dünyadaki doğalsu kaynaklarında elektroliz vb. yöntemler ile üretilen hidrojenin yanması sonucu bu kaynakları besleyecek su tekrar üretilmektedir.

Hidrojen yakıtlarının kullanımlarındaki bir diğer avantaj da, hava kirliliğine olan etkisinin çok düşük düzeyde olmasıdır.

Hidrojenin hava ile yanması sonucu, hidrokarbon yakıtlarda görülen CO, CO₂, SO_x gibi gazlar ve yanmamış hidrokarbonlar oluşmamaktadır. Böylece yanma ürünlerinin oluşturduğu asit yağmuru, fotokimyasal sis, sera etkisi gibi olaylar hidrojenin yakıt olarak kullanımında

söz konusu değildir. Hidrojen yanması sonucu oluşan NO_x bileşenlerinin düzeyi ise, sıcaklık seviyelerindeki artış nedeniyle, öteki yakıtlara oranla daha yüksek olmaktadır. Hidrojenin üretim ve depolama maliyetlerinin günümüzde hala yüksek olması hidrojenin yaygın olarak kullanılamamasının nedenlerinden biridir. Ancak hidrojenin yaygın olarak kullanımına geçilmesi ve üretim kapasitesinin artması ile birlikte maliyet de doğal olarak düşecektir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı; alternatif bir yakıt olarak öne çıkan hidrojenin içten yanmalı benzinli motorlarda günümüz şartlarında kullanılabilirliğini incelemek, motora ek yakıt olarak belli seviyelerde hidrojen göndermenin sadece benzinle çalıştırmaya oranla ne gibi avantajlar ve dezavantajlar getirdiğini kısmi yük şartlarında ele almak, hidrojen üretimi için gerekli enerjiyi ekstra bir güç kaynağından veya motorun alternatöründen sağlayarak bu iki durumu karşılaştırmak, yapılan deneyler sonucu elde edilen performans ve emisyon verilerini irdeleyerek sonuçlar çıkarıp öneriler sunmak, kısacası deneysel olarak kısmi yük şartlarında dört zamanlı ve dört silindirli bir benzin motorunda ek yakıt olarak hidrojen kullanımının performans ve emisyon bakımından sadece benzin kullanmaya göre avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyarak varolan sistemleri geliştirmek için öneriler getirmektir.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışmasına başlamadan önce ek yakıt olarak benzinli içten yanmalı motorlarda hidrojen kullanılmasının kısmi yük şartlarında sadece benzinle çalışmaya göre performans yönünden özgül yakıt sarfiyatında ve motor gücü iyileşme, emisyonlar yönünden ise özellikle karbon içeren egzoz gazlarında azalma ve yanma reaksiyonlarının doğası gereği azot içeren egzoz gazlarında artım gözleneceği öngörülmüştür. Bu ana fikre ek olarak hidrojenin üretilmesi için kullanılacak yöntem olan elektroliz yönteminde harcanacak enerjinin sistemin verimini sadece benzinle çalışan sisteme göre olumsuz etkileyeceği düşünülmüştür. Günümüz mevcut teknolojisine sahip taşıtlarda, motorlara elektroliz yöntemi ile hidrojen takviyesi yapılması konusunda taşıt üzerine kurulacak bir sistemin gerek ekstra güvenlik gerektirmesi gerek hacimsel olarak ekstra yer kaplaması dolayısıyla kullanılabilirliğinin araştırılması gerekli görülmüştür.

Kısacası bu çalışmanın hipotezi; benzinli içten yanmalı motorlarda, elektroliz ile üretilen hidrojenin ek yakıt olarak kullanımının kısmi yük şartlarında sadece benzin ile çalışmaya göre genel motor performansında iyileşmeye ve karbon içeren zararlı emisyonlarda azalmaya neden olacaktır. Araştırmalar ve deneysel çalışmalar yapılırken bu hipotez baz alınmıştır.

BÖLÜM 2

HİDROJEN

Hidrojen 1500'lü yıllarda keşfedilmiş, 1700'lü yıllarda yanabilme özelliğinin farkına varılmış, evrenin en basit ve en çok bulunan elementi olup, renksiz, kokusuz, havadan yaklaşık 14 kat daha hafif ve tamamen zehirsiz bir gazdır. Güneş ve diğer yıldızların termonükleer tepkimeye vermiş olduğu ısının yakıtı hidrojen olup, evrenin temel enerji kaynağıdır. -252.77°C 'da sıvı hale getirilebilir. Sıvı hidrojenin hacmi gaz halindeki hacminin sadece 1/700'ü kadardır. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir (Üst ısıl değeri 140.9 MJ/kg, alt ısıl değeri 120,7 MJ/kg). 1 kg hidrojen 2.1 kg doğal gaz veya 2.8 kg petrolun sahip olduğu enerjiye sahiptir. Ancak birim enerji başına hacmi yüksektir [3].

Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur. En çok bilinen bileşiği ise sudur.

Isı ve patlama enerjisi gerektiren her alanda kullanımı temiz ve kolay olan hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı enerji sistemlerinde, atmosfere atılan ürün sadece su ve/veya su buharı olmaktadır. Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1.33 kat daha verimli bir yakıttır.

Hidrojenden enerji elde edilmesi esnasında su buharı dışında çevreyi kirletici ve sera etkisini artırıcı hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde üretimi söz konusu değildir.

Hidrojen gazı farklı yöntemlerle elde edildiği gibi su, güneş enerjisi veya onun türevleri olarak kabul edilen rüzgar, dalga, ve biyokütle ile de üretilebilmektedir.

Araştırmalar, mevcut koşullarda hidrojenin diğer yakıtlardan yaklaşık üç kat pahalı olduğunu ve yaygın bir enerji kaynağı olarak kullanımının hidrojen üretiminde maliyet düşürücü teknolojik gelişmelere bağlı olacağını göstermektedir. Bununla birlikte, günlük veya mevsimlik periyotlarda oluşan ihtiyaç fazlası elektrik enerjisinin hidrojen olarak depolanması günümüz için de geçerli bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Bu tarzda depolanan enerjinin

yaygın olarak kullanılabilmesi hidrojen yakıtına dayalı otomotiv teknolojilerinin geliştirilmesine bağlıdır.

2.1 Hidrojen Enerjisi

Dünyanın giderek artan enerji gereksinimini çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek en ileri teknolojilerden birinin hidrojen enerji sistemleri olduğu bugün bilim adamlarınca kabul görmektedir.

Kömür, doğalgaz gibi fosil kaynakların yanısıra sudan ve biyokütleden de elde edilen hidrojen, enerji kaynağından çok bir enerji taşıyıcısı olarak düşünülmektedir. Elektriğe 20. yüzyılın enerji taşıyıcısı, hidrojene 21. yüzyılın enerji taşıyıcısı diyen çevreler vardır. Hidrojen yerel olarak üretimi mümkün, kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilen, taşınması sırasında az enerji kaybı olan, ulaşım araçlarından ısınmaya, sanayiden mutfaklarımıza kadar her alanda yararlanılabilecek bir enerji sistemidir.

Hidrojen içten yanmalı motorlarda doğrudan kullanımının yanısıra katalitik yüzeylerde alevsiz yanmaya da uygun bir yakıttır.

2.2 Hidrojen Üretimi

Hidrojen enerji sisteminin yeni olmasına karşın hidrojen üretimi yeni değildir. Günümüzde dünyada her yıl 500 milyar m³ hidrojen üretilmekte, depolanmakta, taşınmakta ve kullanılmaktadır. En büyük kullanıcı payına kimya sanayii, özellikle petrokimya sanayii sahiptir.

Ülkemizde Suni Gübre Sanayii (25.000 m³), bitkisel yağ (margarin) üretimi (16.000 m³), petrol arıtım evleri (rafineri) (1.200 m³), petrokimya endüstrisi (30.000 m³), hidrojene hayvansal yağ üretimi (200-300 m³) ve çeşitli yerlerde kullanılmak üzere basınçlı silindirlerde gaz veya sıvı hidrojen üretimi (6.000 m³) sadece sanayide kullanılmak üzere yapılmaktadır. Enerji üretimi amacıyla ticari boyutlu hidrojen üretimi mevcut değildir.

Hidrojenin üretim kaynakları bol ve çeşitlidir. Fosil yakıtlardan elde edilebildiği gibi güneş, rüzgar, hidrolik enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile suyun elektrolizi yolu ile üretimi, biyokütleden üretimi ve biyolojik proseslerle üretimi mümkündür. Ancak, sayılan bu kaynaklardan kömür ve doğal gaz fosil yakıt olup, sınırlı rezerve sahiptir. Ayrıca fosil yakıtların giderek tükenmekte olması, hidrojen üretiminde geniş kaynaklara sahip olan suyun kullanımını daha avantajlı hale getirmektedir. Her türlü birincil enerji kaynağı yardımıyla üretilen hidrojen, günümüzde suni gübreden, nebati yağlara, roket yakıtlarına

kadar çeşitli alanlarda kullanılmakta ve bunun için dünyada her yıl 600 milyar metreküp hidrojen üretilmektedir. Hidrojen üretimi için çok eskiden beri bilinen bir yöntem, bileşiği H_2O olan suyun içindeki hidrojeni elektroliz yoluyla ayırmaktır. Günümüzde hidrojen ağırlıklı olarak doğal gazdan buhar reformasyonu sonucu elde edilmektedir. Suyun elektrolizi bilinen bir yöntem olmakla beraber ekonomik hale getirilmesi konusunda çalışmalar, yine benzer şekilde güneş enerjisinden biyoteknolojik yöntemlerle hidrojen üretimi konusunda araştırma-geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Hidrojen üretimi yöntemlerini tanımlarken, kullanılacak birincil enerji kaynaklarını da ayrıca belirtmek yerinde olacaktır. Buna göre hidrojen, fosil yakıtlar yardımıyla olabildiği gibi, güneş, rüzgâr, dalga enerjileri, jeotermal enerji ve biyokütle gibi birincil enerji kaynaklarının hepsi ile aşağıda tanımlanan yöntemlerin her hangi biri ile üretilir [4].

- Hidrojenin Fosil Yakıtlardan Üretimi
- Doğalgazın Buhar Reformasyonu
- Parçalı Oksidasyon
- Doğalgazın Termal Olarak Parçalanması
- Kömür Gazlaştırılması
- Biyokütleden Hidrojen Üretimi
- Sudan Hidrojen Üretimi (Elektroliz)
- Suyun Direk Termal Ayrıştırılması (Termoliz)
- Termokimyasal Çevrimler
- Fotoliz
- Bor Mineralinden Hidrojen Üretimi

Günümüzde sanayide kullanılan hidrojen büyük miktarlarda, doğal gaz, petrol ürünleri veya kömür gibi fosil yakıtlardan elde edilmektedir. En çok kullanılan yöntemler, doğalgazın katalitik buhar ıslahı, petrolün kısmi oksidasyonu, buhar demir işlemi ve kömür gazlaştırılması şeklindedir. Bunlardan başka, temel amacı hidrojen üretimi olmakla birlikte başka sanayi maddelerinin üretimi sırasında, yan ürün olarak hidrojen elde edilen yöntemler arasında, klor-alkaliden karşıt klor üretimi, ham petrolün rafineri işleminde hafif gazların üretimi, kok fırınlarında kömürden kok üretimi ve margarin sanayisinde kimyasal hidrojenerasyon işlemleri sayılabilir [5], [6].

2.2.1 Yakıt Zenginleştirme Amaçlı Hidrojen Üretim Yöntemleri ve Önceki Çalışmalar

Yakıt zenginleştirmek için hidrojen kullanımının en büyük sınırlayıcıları maliyet ve üretim ile depolama zorluklarıdır. Günümüzde yakıt zenginleştirmek için hidrojen üretiminin üç ana seçeneği vardır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır:

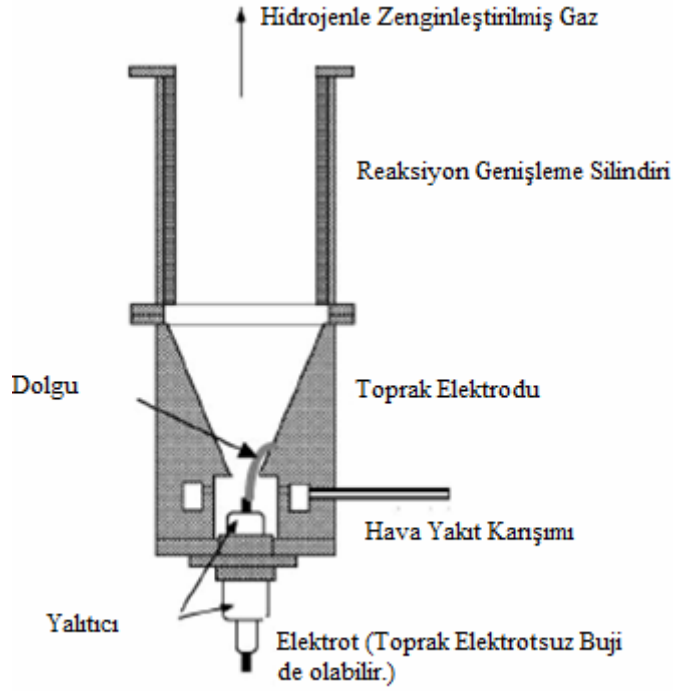
- Elektrolizden hidrojen üretmek ya da sabit bir noktada dönüştürmek ve araç üzerindeki tanklarda depolama için hidrojeni sıkıştırmak.
- Bir yakıt dönüştürücüsü ile araç üzerinde hidrojeni yeniden üretmek ve aracın hidrokarbon yakıt deposundan gerektiği gibi hidrojeni göndermek.
- Aracın alternatöründen güç alarak yapılan elektroliz işlemiyle sudan araç üzerinde hidrojen üretmek.

Sıkıştırılmış hidrojen yakıt zenginleştirmede hidrojen kullanmada büyük ihtimalle en basit fakat en pahalı metoddur. Hidrojen araçtan uzakta üretilmeli, sıkıştırılmalı ve araçta depolanmalıdır. Bütün bu basamaklar yüklü bir miktar maliyet gerektirir.

Bir yakıt dönüştürücüsü sıvı yakıtı hidrojen zengini bir gaza çevirmek için yüksek sıcaklıklardaki gazların iletkenliğini kullanan plazmatronlar ve elektrikli gaz ısıtıcıları kullanır. Plazmatron yakıt dönüştürücülerinin motor verimini %35'e kadar arttırdığı görülmüştür [7]. Şekil 2.1 bir plazmatron yakıt dönüştürücüsünün bir örnek diyagramını göstermektedir. Çizelge 2.1, düşük akımlı bir plazmatron yakıt dönüştürücüsünün tipik çalışma parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 2.1 Düşük akımlı bir plazmatron yakıt dönüştürücüsünün tipik çalışma parametreleri [8]

Güç	50-300 KW
Akım	15-120 mA
H ₂ akış oranı	30-50 l/dk
Yükseklik	25 cm
Hacim	2 l
Ağırlık	3 kg



Şekil 2.1 Düşük akımlı plazmatron yakıt dönüştürücüsü [8]

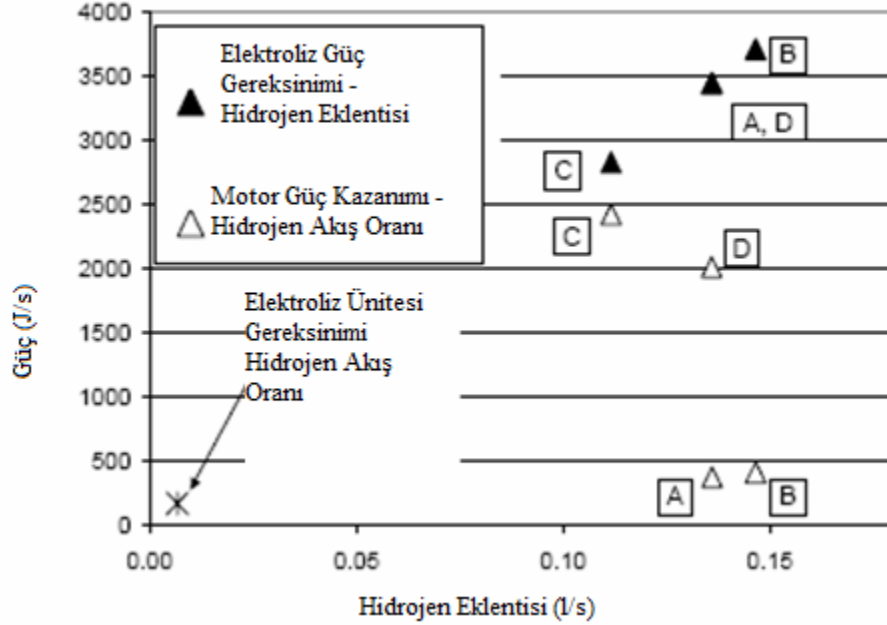
Suyun elektrolizi hidrojen ve oksijen gazlarını üretmek için suyun içinden bir elektrik akımı geçirerek su moleküllerinin bağlarını kırma işlemidir. Suyun elektrolizinin ürünleri sadece hidrojen eklemeye göre performans ve emisyonlarda önemli bir iyileşme göstermiştir.

Kanada'daki Windsor Üniversitesi, 2 birim hidrojene 1 birim oksijen gelecek şekilde elektroliz ürünlerini ekleme üzerine bir simülasyon gerçekleştirmiştir. Bu çalışma CHEMKIN kinetik simülasyon yazılımını kullanmıştır. Emisyonların düşürülmesinde ve performansın artırılmasında %10 hidrojen ve oksijen eklemenin tek başına %20 hidrojen eklemeye eşdeğer olduğu görülmüştür [9].

Windsor Üniversitesi tarafından gerçekleştirilen bir ikinci çalışmada bir motora elektroliz ürünlerinin eklenmesinin etkisini simüle etmek için deneysel bir yöntem geliştirilmiştir. Hidrojen ve oksijenden oluşan bir karışımı sıkıştırmanın tehlikelerinden dolayı %98 hava, %2 hidrojen ve %1 oksijen içeren bir tank hazırlanmıştır. Bu karışım daha sonra elektroliz ürünlerinin etkisini test etmede kullanılmıştır. Bu karışımın sadece hidrojenle aynı yararları sağladığı ve oksijenin performansı etkilemediği görülmüştür [10].

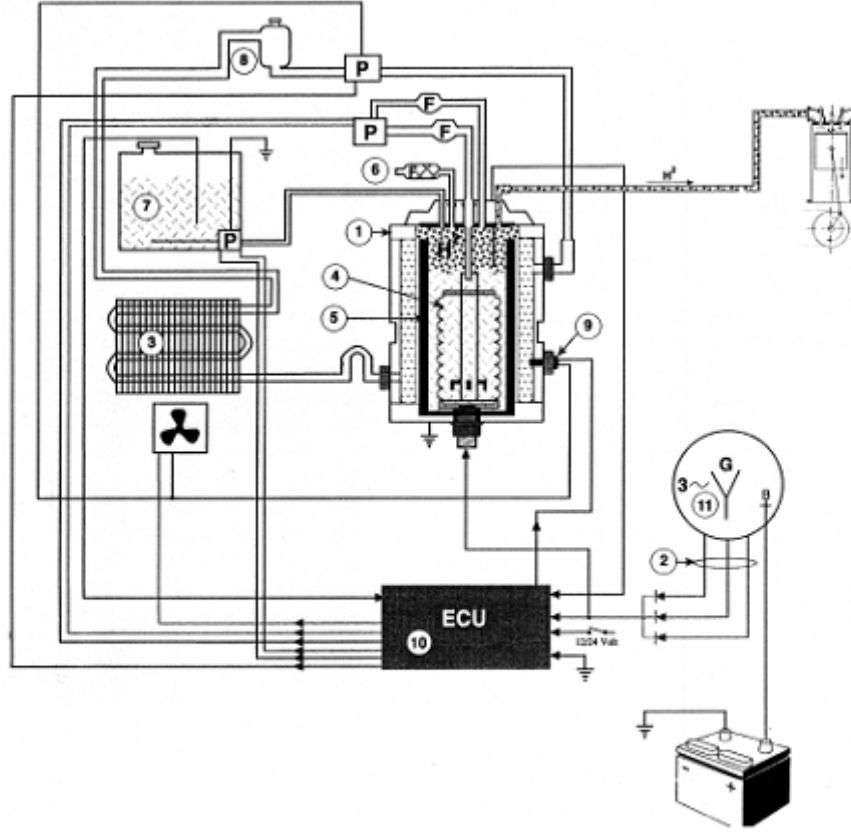
Araç üzerinde hidrojen üretimi için 169 W'da 6.7 ml/s üreten bir ticari elektroliz ünitesinin performansı temel olarak alınmıştır [11]. Elektroliz ürünlerinin radikalleri de değil sadece hidrojen ve oksijen içerdiği varsayılmıştır. Ayrıca bu düzenekte performansı optimize etmek için hiçbir zamanlama ayarı yapılmamıştır. Bu çalışma bir elektroliz ünitesinin elektroliz prosesi için gereken enerjiyi karşılayacak yeterli performans artışını sağlayamayacağı sonucu

ile noktalanmıştır. Şekil 2.2 bir elektroliz ünitesinin yanmayı zenginleştirmek için hidrojen sağlama kabiliyeti hakkında Windsor Üniversitesi'nin değerlendirmelerini göstermektedir [10].



Şekil 2.2 Elektroliz için güç gereksinimi ve hidrojen eklenmesi ile motordan alınan güç (Windsor Üniversitesi) [10]

Windsor Üniversitesi'ndeki bulguların aksine, Kocaeli Üniversitesi yanma zenginleştirilmesi için hidrojen ve oksijen sağlamak için bir elektroliz sistemi patentinin kopyasını yapmıştır. Bu ünite bir platin anodun etrafını saran silindirik bir karbon katottan oluşmaktadır. Bu ünite 3A'de 90 volt sağlamakta ve yaklaşık 20 sL/h hidrojen üretmektedir [12]. Şekil 2.3 Kocaeli Üniversitesi'nin hidrojen zenginleştirme düzeneğinin bir diyagramını göstermektedir. Çizelge 2.2 üniversitenin elektroliz ünitesinin özelliklerini göstermektedir.



Sistemin Genel Yapısı (1. Elektroliz Ünitesi, 2. İkincil Devreler, 3. Radyatör, 4. Anot Elektrodu, 5. Katot Elektrodu, 6. Hava Filtresi, 7. Su Tankı, 8. Soğutma Suyu Tankı, 9. Su Sıcaklığı Sensörü, 10. Sistemin Elektronik Kontrol Ünitesi, 11. Alternatör, P - Su Pompası, F - Su Filtresi).

Şekil 2.3 Kocaeli Üniversitesi'ndeki elektroliz ünitesi [12]

Çizelge 2.2 Kocaeli Üniversitesi elektroliz ünitesi teknik özellikleri [12]

Maksimum gaz	20 l/sa
Katot elektrodu	Karbon
Anot elektrodu	Platin
Elektroliz voltajı	90 V
Elektroliz akımı	3 A
Su	Normal çeşme
Su tankı hacmi	2.5 l
Su tüketimi	100 ml/250 km
Su miktarı	Elektronik
Su sıcaklık	45-50°C
Soğutma	Su soğutmalı
Boyutlar	150 x 140 x 135
Ağırlık	2 kg

Bu sistem dört araç üzerinde test edildi, yakıt tüketimi ve emisyonlar ölçüldü. Çizelge 2.3 bu testin sonuçlarını göstermektedir. Motora elektroliz ürünlerini eklemek için bu sistemi

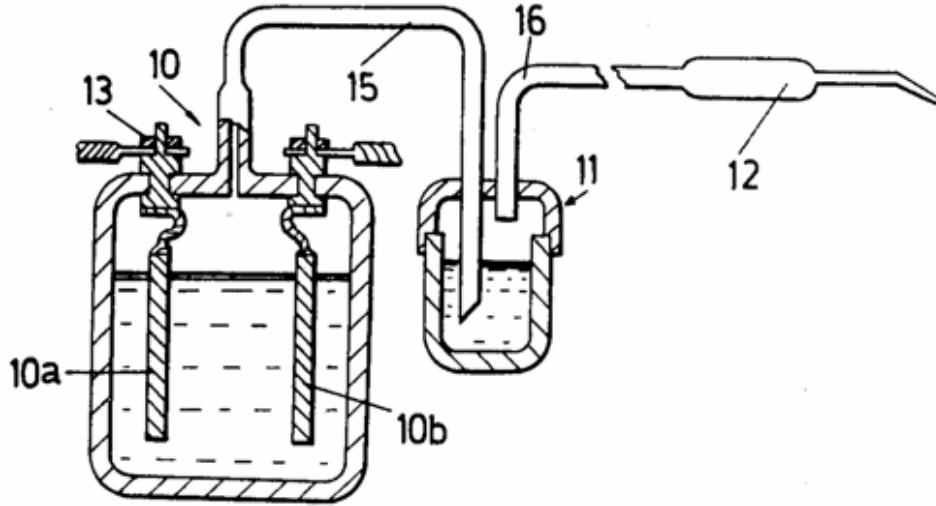
kullanmanın yakıt ekonomisini %25-40 arası arttırdığı gösterilmiştir. Bu araçlar için emisyonlar da test edildi ve motor türüne göre %40-50 arası azaldıkları görüldü. Bu araçların performanslarında kaydadeğer bir düşüş görülmedi.

Çizelge 2.3 Kocaeli Üniversitesi elektroliz testi sonuçları [12]

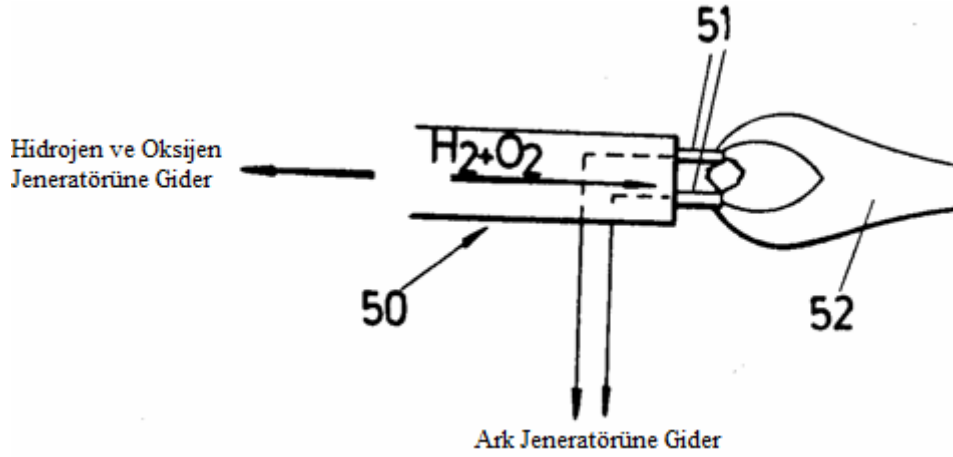
Kocaeli Üniversitesi Elektroliz Testi Sonuçları	
Araç	% Yakıt Ekonomisi Artışı
1993 Volvo 940	%42.9
1996 Mercedes 280	%36.4
1992 Fiat Kartal	%26.3
1992 Fiat Doğan	%33.3

Bu iki çalışma incelendiğinde teorik modellenmiş sonuçlar ile araçlarda elektroliz üniteleri ile yapılan gerçek deneyler arasında bir çelişki olduğu görülmektedir. Ya deneyler isabetli yapılmamış ya da motorlarda suyun elektroliz ürünlerinin etkisi üzerine oluşturulan modellerdeki varsayımlarda bir hata oluşmuştur. Buradan çıkarılabilecek sonuç motorlarda gerçek elektroliz üniteleri ile daha ileri testlerin yapılması yönündedir.

Verimli elektroliz üzerine teoriler – 1970’lerde hem profesör hem de mucit olan Yull Brown kaynak operasyonlarında kullanım için bir elektroliz güçlü şaluma tasarlamıştır. Bu elektroliz ünitesi moleküler hidrojen ve oksijen çıkışını bir elektrik arkından geçirmek üzere tasarlanmıştır. Brown patentlerinde elektrik arkının moleküler hidrojen ve oksijeni atomik hidrojen ve oksijen radikallerine ayırdığını belirtmiştir. Bu atomik radikaller yandığı zaman ortaya moleküler hidrojen ve oksijen yandığı zaman normalde çıktığı varsayılan enerji miktarından varsayımlara göre gram mol başına ek bir 218,000 kalorilik bir enerji elde edilmektedir [13].



Şekil 2.4 US Patent: 4,081,656'dan Yull Brown'ın elektroliz ünitesi [13]



Şekil 2.5 Arktan geçen hidrojen [13]

Sıkça “Brown’ın Gazı” da denilen elektrolitik gaz incelenmiş ve değerlendirilmiş bir takım ilginç özelliklere sahiptir. “Brown’ın Gazı” hidrojeni ve oksijeni birbirinden ayırma ihtiyacı olmadan üretilebilmektedir böylece anot ve katot arasındaki elektriksel direnç minimize edilebilir ve elektrolitik hızı maksimize edilebilir. Gazın yanmasının başka bir ilginç etkisi de içeriye doğru patlayarak yanmasıdır. Bu içe doğru yanma muhtemelen atomik hidrojen ve oksijenin ortamda bulunmasından dolayıdır. Çalışmalar gösteriyor ki içe doğru patlama karışımındaki hava miktarı %5’ten az olduğu zamanlarda gerçekleşecektir yoksa dışa doğru genişleyen patlama olacaktır [14].

Hidrojen ve oksijenin radikal atomları bağ kurduğu zaman kristalleşen π -bağları olarak adlandırılan bağları oluştururlar. Bu π -bağları π -uzak kızılötesi ışınlarını oluştururlar. Bu π -uzak kızılötesi ışınları maddelerin yanarken içeri odaklanmasına neden olan güçlü bir yarıemperyal boşluk oluştururlar. Bu etkinin normal hidrojenin yanma sıcaklığı 2700 °C

aralığında iken Brown'ın Gazının 6000 °C üstü bir aralıkta bir yanma sıcaklığına sahip olmasını sağladığı gözlemlenmiştir [14].

Elektroliz ünitelerinin deneysel verilerinden, hidrokarbon yakıtları zenginleştirmek için yapılan uygulamalarından ve Brown'ın Gazı uygulamaları hakkındaki bilgilerden açıkça görülüyor ki elektroliz ürünleri sadece moleküler hidrojen ve oksijen olarak kabul edilemez. Elektroliz ürünlerinin yanmayı zenginleştirmek için kullanılıp kullanılmayacağını belirlemek için daha ileri araştırma ve deneyler yapılmalıdır.

2.3 Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin üretilmesini takiben depolanması gerekir. Genel olarak hidrojenin kullanıldığı her yerde depolanmasına ihtiyaç vardır. Taşıtlarda hidrojenin kullanılması durumundaysa depolama daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bakımdan üretilen hidrojen iki ayrı grupta depolanması şeklinde incelenebilir. Birincisi merkezi bir jeneratör, güneş-hidrojen enerji sistemi, rüzgar-hidrojen enerji sistemi, hidrolik - hidrojen enerji sistemi vb. gibi merkezi olarak üretilen hidrojenin depolanması; ikincisiyse ısınma, pişirme ya da taşıtlardaki kullanım amaçlı depolanmasıdır.

Merkezi olarak depolamada boşaltılmış doğal gaz yatakları, mağaralar ve büyük depolama tankları kullanılmaktadır.

İkinci tip dediğimiz daha çok taşıtlar için tasarlanan depolama şekilleridir ki yaygın olarak 3 yöntem üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bunlar; gaz hidrojen, sıvı (kriyojenik) hidrojen ve metal hidritler şeklinde depolamadır.

Hidrojenin belki de en önemli özelliği, depolanabilir olmasıdır. Bilindiği gibi, günümüzde büyük tutarlarda enerji depolamak için hala uygun bir yöntem bulunmuş değildir. Eğer bugün hidroelektrik santrallerinden elde edilen enerjinin depolanması mümkün olsaydı, enerji sorununu bir ölçüde çözmek mümkün olabilirdi. Ancak, elektrik enerjisi için bilinen en iyi depolama yöntemi hala asitli akümülatörlerden başka bir şey değildir.

Hidrojen gaz veya sıvı olarak saf halde tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak karbon nanotüplerde veya kimyasal olarak hidrür şeklinde depolanabilmektedir.

Hidrojen uygun nitelikli çelik tanklarda gaz veya sıvı olarak depolanabilir. Ancak gaz olarak depolamada yüksek basınç nedeniyle tank ağırlıkları problem yaratmaktadır. Hidrojen gazını depolamanın belki de en ucuz yöntemi, doğal gaza benzer şekilde yer altında, tükenmiş petrol

veya doğal gaz rezervuarlarında depolamaktır. Maliyeti biraz yüksek olan bir depolama şekli ise, maden ocaklarındaki mağaralarda saklamaktır.

Hidrojen petrole göre 4 kat fazla hacim kaplar; hidrojenin kapladığı hacmi küçültmek için hidrojeni sıvı halde depolamak gereklidir. Bunun için de yüksek basınç ve soğutma işlemine ihtiyaç vardır. Sıvılaştırılmış hidrojen yüksek basınç altında çelik tüpler içinde depolanabilir. Bu yöntem orta veya küçük ölçekte depolama için en çok kullanılan yöntemdir. Ancak büyük miktarlar için oldukça pahalı bir yöntemdir. Çünkü hidrojen enerjisinin yaklaşık ¼'ü sıvılaştırma işlemi için harcanmalıdır. Bir diğer pratik çözüm ise, sıvı hidrojenin düşük sıcaklıktaki tanklarda saklanmasıdır. Uzay programlarında, roket yakıtı olarak sürekli şekilde kullanılan sıvı hidrojen bu yöntemle depolanmaktadır. Dünyadaki en büyük sıvı hidrojen tankı, Kennedy Uzay Merkezinde olup 3400 m³ sıvı hidrojen alabilmektedir. Bu miktar hidrojenin yakıt olarak değeri 29 milyon Mega Joule'e veya 8 milyon kWsaat'e karşılık gelmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucu hidrojen karbon nanotüplerde de depolanabilmektedir. Karbon nanotüpler kısaca grafit tabakaların tüp şekline dönüşmüş halidir. Çapları birkaç nanometre veya 10-20 nanometre mertebesinde, boyları ise mikron seviyesindedir.

Hidrojen kimyasal olarak metallerde, alaşımlarda ve arametallerde hidrür olarak depolanabilmektedir. Metal hidrürler hidrojen depolamak için çok uygun bir yöntem olmasına karşın, kendi ağırlıkları ciddi sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle son 10 yıldır yüksek depolama kapasiteleri nedeniyle alüminyum ve bor içeren kompleks hidrürler üzerine yoğun olarak çalışılmaktadır. Bor içeren kompleks hidrürler sıvı koşullarda kullanılması nedeni ile de önem taşımaktadır. Bor esaslı sistemler ana olarak sodyum bor hidrürü esas almaktadır. NaBH₄, katı halde ağırlıkça %10,5 hidrojen içermektedir.

Çözelti halinde, sodyum bor hidrür, (2.1) eşitliğindeki reaksiyona göre hidrojenini vermekte ve sodyum metaborata dönüşmektedir.

(katalizör)



H₂O ve NaOH ilavesi ile sodyum bor hidrürün sıvı içerisindeki miktarı ağırlıkça %20-35 arasında olabilmekte, bu da sistemde ağırlıkça %4.4-7.7 arasında hidrojenin depolanmasına olanak vermektedir.

Sodyum bor hidrürde hidrojen depolamanın en önemli üstünlüğü depolanan hidrojenin oda sıcaklığında geri alınabilmesi ve geri alımın katalizör yardımı ile kolaylıkla kontrol

edilebilmesidir. Sodyum bor hidrürün hidrojen amaçlı kullanımında en önemli darboğaz, oluşan metaboratın tekrar NaBH_4 dönüştürülmesidir.

2.4 Hidrojenin Taşınması

Hidrojen gazı, doğal gaz veya hava gazına benzer olarak borular aracılığıyla her yere kolaylıkla ve güvenli olarak taşınabilmektedir. Hidrojen boru ile taşınmasına, Texas'da petrol sanayi tarafından kullanılmakta olan ve 80 km uzunluğuna sahip boru şebekesi ile Almanya'da Ruhr havzasında 1938 yılında işletmeye açılan ve bugün 15 atmosfer basınç altında hidrojen taşımaya devam eden 204 km'lik boru hattı örnek olarak gösterilebilir.

Basınçlı hidrojenin, çelik tüpler içine yerleştirilerek taşınması, bu güne kadar geliştiren bir çok deneme amaçlı hidrojenle çalışan taşıtta kullanılan yöntem olmuştur. Burada görülen en büyük sorun çelik tüplerin kendi ağırlıklarıdır. Benzinli bir otomobil ortalama olarak 65 litre (47 kg) benzin almakta olup, bu da enerji olarak 17 kg hidrojene karşılık gelmektedir. Hidrojeni sıvı olarak depolamak ağırlık sorununu çözmekle birlikte, tank hacmi ve maliyet artmaktadır. Diğer bir sorun ise, hidrojenin gaz haline geçmesi ile oluşan kayıplar ve yakıt ikmali zorluğudur.

2.5 Hidrojen Enerjisi Teknolojisinin Dünyadaki Gelişimi

Hidrojen, karbon içermeyen oldukça temiz bir yakıt olmasına karşın, günümüz içten yanmalı motorlarında depolama ve elde edilme maliyetinden dolayı yaygın olarak kullanılamamaktadır. Ancak, günümüzde hidrojen Kanada'da ve Avrupa ülkelerinde devlet teşvikiyle geçiş aşamasındadır ve hidrojene büyük yatırımlar yapılmaktadır. Başta BMW, Mazda, MAN, Ford gibi otomotiv devleri olmak üzere, Avrupa ve Kanada'da birçok firma günümüz motorlarının hidrojene dönüştürülebilmesi üzerine çalışmalar yapmaktadırlar; hatta bazıları ürünlerini piyasaya sürmüşlerdir.

Eski ABD Başkanı G.W. Bush 28 Ocak 2003 tarihinde yaptığı bir konuşmada hidrojen enerjisini hürriyet yakıtı olarak tanımlamış ve bu alandaki çalışmalara destek amacıyla 1.7 milyar dolarlık bir kaynak ayrıldığını söylemiştir.

Japonya'da WE-NET (World Energy Network) projesi ile Tokyo metropolitan bölgesinde hidrojen kullanımı ile oluşacak azot oksit emisyonundaki azalma potansiyeli araştırılmaktadır. WE-NET Programı Japonya'nın Uluslar Arası Ticaret ve Endüstri Bakanlığınca desteklenmektedir. Bu programda Japonya hidrojen enerji sistemini geliştirmek üzere 2020 yılına kadar 4 milyar \$'lık bir bütçe ayırmıştır. Gelecekte de Pasifik denizinin ekvator

bölgesinde yapay bir adada solar radyasyon kullanarak deniz suyundan elektrolizle hidrojen üretmeyi planlamaktadırlar. Sadece Tokyo'da şehrin elektrik ihtiyacının 40.000 kW'lık bölümü hidrojen enerji sistemlerinden sağlanmaktadır.

Almanya'da Münih havaalanında çalışan otomobil ve otobüslerin hidrojen enerjisi kullanması yönündeki projenin yanısıra Neurenburg yakınlarında mini bir hidrojen enerji sisteminin kurulduğu bir program yürütülmektedir. Solar-Wasserstoff-Bayern burada güneş hidrojen tesisi, depolama sistemi ve hidrojen kullanma sistemleri kurmuştur. Almanya ayrıca Suudi Arabistan ile ortak yürüttüğü Hysolar programı ile Suudi Arabistan'ın Riyad yakınında güneş hidrojen üretim tesisi kurmayı planlanmaktadır. Suudi Arabistan hidrojeni ihraç edecektir.

Avrupa ve Kanada arasındaki Euro-Quebec bir diğer uluslararası başarılı programdır. Bu programda nispeten ucuz olan hidrogüçten üretilerek Kanada'dan Avrupa'ya ithal edilecek sıvı hidrojenin deniz aşırı taşınımı, depolanması ve kullanım alanları araştırılmaktadır.

İzlanda'da hükümet, üniversiteler, taşıma şirketleri, fabrikalar ve çok uluslu otomobil ve petrol şirketleri konsorsiyumu oluşturulmuş ve 2030 yılına kadar İzlanda'nın tamamen hidrojen enerjisine geçmesi planlanmıştır. Dünyanın ilk hidrojen dolun istasyonu Shell tarafından İzlanda'da açılmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.6 Bir hidrojen yakıtı istasyonu (SHELL'in HYDROGEN istasyonu)

Brezilya ve Güney Amerika'da en büyük hidrogüç tesisi Haipu'dur. Burada elektrolitik hidrojen gazı üretilmektedir.

Petrol şirketlerinin enerji ortamı olarak hidrojene bakışları kuşku dolu olsa da son yıllarda bu bakış açısı değişmektedir. Bu şirketlerden Londra'da Royal Dutch Shell, Shell Hidrojen adını verdikleri şubelerine hidrojen konusunda araştırmaları için 500 milyon \$ yatırım yapmıştır. BP'de benzer bir girişimde bulunmuştur.

Taşıtlarda hidrojenin içten yanmalı motorlar aracılığıyla kullanımı konusunda, Daimler-Benz şirketinin sıfır salımlı minibüsü, BMW, Dodge, Buick, Suzuki firmalarının deneme otomobilleri, Macchi-Ansaldo'nun ve MAN firmasının SL202 otobüsleri, Kanada demiryollarının Lokomotifi ile Almanya, Avustralya ve Kanada donanmaları için imal edilen denizaltılar sayılabilir.

HİDROJEN YAKITININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Özellikle içten yanmalı motorlar için büyük önem taşıyan yakıtların bazı özelliklere sahip olması istenir. Bu özellikler idealize edilecek olursa şöyle sıralanabilir:

- Kolaylıkla ve güvenli olarak her yere taşınabilmeli
- Her yerde (sanayide, evlerde, taşıtlarda) kullanılabilmesi, depolanabilmesi
- Birim kütle başına yüksek ısıl değerde, temiz, güvenli, hafif olmalı
- Isı, elektrik ve mekanik enerjiye kolaylıkla dönüşebilmeli
- Yüksek verimle enerji üretilebilmesi ve ekonomik olmalı

İdeal şartlarda yukarıdaki özellikler istenir. Gerçekte bu özelliklerin tamamına sahip bir yakıt yoktur. Fakat hidrojenin bu kategoriye en uygun olan yakıt olduğu söylenebilir.

Hidrojenin en önemli özelliği sıvı ve gaz olarak kullanılabilmesidir. Gaz halindeki hidrojen, aynı hacimdeki havadan yaklaşık 14 kez daha hafiftir. İçten yanmalı motorlarda kullanılmakta olan yakıtlarla karşılaştırıldığında ise, sıvı hidrojenin sıvı hidrokarbon yakıtlara oranla yaklaşık 10 kere daha hafif, gaz halindeki hidrojenin ise metan, doğal gaz vb. gaz halindeki yakıtlardan yine 10 kere daha hafif olduğu görülecektir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 Hidrojen, benzin ve metanın yakıt özellikleri [15]

Özellik	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk, (kg/m ³)	803	0.65	0.084
Hava içindeki difüzyonu, (cm ² /s)	0.05	0.16	0.61
Sabit basınçta özgül ısısı, (J.g/K)	1.20	2.22	14.89
Hava da ateşlenme sınırı, (%hacim)	1.0-7.6	5.3-15.0	4.0-75.0
Havada ateşlenme enerjisi, (mJ)	0.24	0.29	0.02
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, (°C)	228-471*	540	585
Adyabatik alev sıcaklığı, (°C)	2197	1875	2045
Patlama enerjisi, (g.TNT . k/j)	0.25	0.19	0.17
Alev yayılması (emisivitesi), (%)	34-42	25-33	17-25

* Benzinin kompozisyonuna bağlı

Çizelge 3.2 Hidrojen ve benzinin yanma özellikleri [16]

Yakıt	Hidrojen	Benzin
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	585	300-480
Min. tutuşma enerjisi (mJ)	0.02	0.25
Tutuşma aralığı (% hacim)	4-75	1.3-7.1
Maks. laminer alev hızı (cm/s)	270	30
Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	0.63	0.16

Hidrojenin difüzyon katsayısı (0.63 cm²/s), benzinin difüzyon katsayısının (0.16 cm²/s) yaklaşık 4 katıdır. Bu özellik, yakıtın hava ile daha homojene yakın bir karışım oluşturmasını sağlayarak yanmayı iyileştirir. Hidrojenin laminer alev hızı (270 cm/s), benzinin laminer alev hızının (30 cm/s) yaklaşık 5 katıdır. Hidrojenin laminer alev hızının daha yüksek olması, sabit hacimde yanma prosesinin ideale daha yakın gerçekleşmesini ve dolayısıyla termik verimin artmasını sağlar [15].

Hidrojen oldukça fakir hava fazlalık katsayılarında yanabilme özelliğine sahiptir. Hidrojen benzinden yedi kat ve metandan da beş kat daha fakir karışımlarda yanabilir [5].

Hidrojenin motorlarda yakıt olarak kullanımında avantaj sağlayacak en önemli özelliklerden bir diğeri tutuşma sınırlarının çok geniş yakıt karışım oranlarına uzanmasıdır.

Hidrojenin hacimce tutuşma aralığı (%4.1-75), benzinin hacimce tutuşma aralığına (%1.5-7.6) göre oldukça yüksektir. Bu da, hidrojenin ek yakıt olarak benzinde kullanılmasıyla yakıtın daha geniş tutuşma aralığına sahip olmasını ve daha fakir karışım değerlerinde tutuşmanın gerçekleşebilmesini sağlar [17].

Hidrojenin tutuşma enerjisinin benzinin 10'da 1'inden düşük olması sebebiyle, hidrojenin ek yakıt olarak benzinde kullanılmasıyla, çok fakir karışımlarda dahi çok rahat tutuşma

gerçekleşebilmektedir [18]. Yapılan çalışmalara göre, fakir karışımlarda çalışan benzinli motorlara belli bir oranda hidrojen katılmasıyla termik verim ve emisyon değerleri olumlu yönde etkilenir [17]. Çizelge 3.2’de hidrojen ve benzinin bazı özellikleri görülmektedir.

Hidrojenin alev hızı diğer yakıtlardan çok daha hızlıdır ve çevreye daha az ısı transferiyle oksidasyona izin verir. Bu ısı verimleri artırır. Hidrojenin en ciddi dezavantajı alt ısı değeri diğer hidrokarbonlardan büyük olmasına rağmen daha az yoğun olmasıdır bu da belli bir hacimde hidrojenin daha az enerjiye sahip olduğu anlamına gelir [5], [19].

Hidrojenin oktan sayısının yüksek olması, sıkıştırma oranının artırılmasına ve bu sayede termik verimle birlikte motor gücünün de artmasına olanak sağlar.

Hidrojen, hava içerisinde %4 ile %75 oranları arasında bulunduğu tutuşabilmektedir. Benzin-hava karışımlarında, hava fazlalık katsayısının 0.3-1.7 değerleri arasında tutuşma sağlanabilmekte iken, hidrojen-hava karışımları için bu sınır 0.14-4.35 değerlerine ulaşmaktadır. Hidrojen-hava karışımları, gaz yakıtlara göre de daha geniş tutuşma sınırlarına sahiptir. Örneğin metan-hava karışımlarının tutuşabilmesi için hava fazlalık katsayısının 0.6-1.9 değerleri arasında bulunması gerekmektedir. Hidrojenin alt ısı değeri de öteki mevcut motor yakıtlarından daha yüksektir (hidrojen için 119.93 kJ/g, benzin için 43.4 kJ/g). Ancak hacimsel olarak ele alındığında hidrojenin alt ısı değeri diğer yakıtlara göre daha azdır (hidrojen için 8.41 Mj/litre, benzin için 31.8 Mj/litre, metanol için 15.9 Mj/litre, metan için 20.8 Mj/litre). Hidrojenin adyabatik alev sıcaklığı ise benzinle aynı mertebelindedir (Hidrojen 2318 K, Benzin 2470 K, Metan 2148 K).

HİDROJENİN YAKIT OLARAK KULLANILMASI

Bir yakıtın her yerde, örneğin, sanayide, evlerde, taşıtlarda kullanılabilmesi büyük önem taşımaktadır. Diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında, bunların birçoğunun ancak belirli uygulamalar için kullanılabildiği görülmektedir. Kömürü, otomobiller de veya uçaklarda kullanmak pratik açıdan uygun değildir. Hidrojen ise, hemen her yerde kolaylıkla kullanılabilir. Evlerde, ısıtma amacı ile kalorifer, fırın ve şofbenlerde doğal gaz yerine rahatlıkla kullanılabilir. Fakat hidrojenin doğal gaza göre daha az olan yoğunluğu nedeniyle, daha fazla miktarda hidrojenin kalorifer sistemindeki yakıcıya gelmesi gerekir. Hidrojenin oksijenle birleşerek doğrudan yakıldığı bu sistemlerde, atık ürün suyun yanında, alevin yüksek sıcaklığa çıkmasından dolayı az bir miktar azot oksit oluşabilmektedir. Katalitik yüzeylerde alevsiz yakma mümkün olduğundan, bu tür ısıtıcılarda güvenli olarak ve azot oksit oluşmasına yol açmadan da kullanılabilir [4].

4.1 Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılması

Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımı 19. yüzyıl başlarına kadar uzanır ve geçmişte içten yanmalı motorlarda hidrojen kullanılması üzerine pek çok çalışmalar yapılmıştır. Bunların birçoğu karbürasyonlu sistemler üzerine, bir kısmı ise hidrojenin ek yakıt olarak kullanılması üzerinedir [19]. Ancak, karbürasyonlu sistemlerde hidrojenin düşük hacimsel alt ısı değerinden dolayı, alınabilecek güç oldukça sınırlıdır. Hidrojenin ek yakıt olarak sanayi tipi elektroliz üniteleriyle kullanılmasında, emisyonlarda bir takım değişiklikler olmakla beraber, performansta önemli değişiklikler gözlenmemiştir. Gelişen hassas elektronik kontrol sistemlerinin yaygınlaşmasıyla, hidrojenin içten yanmalı motorlarda direkt yakıt olarak kullanımı üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. Son yıllarda, otomotiv firmalarının motorların hidrojene çevrilmesi ile ilgili yaptığı çalışmalar; hidrojenin araçlarda yaygın olarak kullanılması açısından umut vericidir.

Genelde bir içten yanmalı motoru hidrojenle çalıştırmak zor değildir. Fakat içten yanmalı motorun iyi çalışmasını sağlamak daha bir zorlayıcıdır. Bir hidrojen motoru ile iyi çalışan bir hidrojen motoru arasındaki farkı gerçekleştirmek için anahtar bileşenleri ve teknikleri bilmek büyük önem taşır.

Bir hidrojen motoru geliştirmedeki en erken deneme 1820’de Reverend W. Cecil tarafından bildirilmiştir. “Makinelerden İtme Kuvveti Elde Etmek için Hidrojen Gazının Kullanılması Üzerine” başlığına sahip bir makale içinde Cecil çalışmasını Cambridge Felsefe Topluluğu önünde sunmuştur. Motorun kendisi, atmosferik basıncın pistonu bir vakuma karşı itip güç sağladığı vakum prensibine göre çalışmaktaydı. Vakum bir hidrojen-hava karışımının yakılması ve genişleyip daha sonra soğuması ile oluşturuluyordu. Motor yeterli çalışmasına rağmen vakum motorları asla pratikte yer bulamadı.



Şekil 4.1 Hidrojenle çalışan 1965 model bir Cobra replikası.

Çizelge 4.1’de bugüne kadar geliştirilmiş ve geliştirilmekte olan hidrojen yakıtlı taşıtlar genel olarak belirtilerek özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 Hidrojen taşıtlarına genel bakış

İsim	Yıl	Motor	Tank	Kapasite	Yolculuk	Üretilen
Rivaz	1807	1	Sıkıştırılmış			Prototip
Lenoir	1860	1	Su elektrolizi			Prototip
Norsk	1933		Amonyak			Prototip
Musashi 1	1974		Sıkıştırılmış	7 Nm ³		Prototip
Musashi 2	1975		Soğuk	230 L		Prototip
Musashi 3	1977	2	Soğuk	65 L		Prototip
BMW	1979	3.5 L	Soğuk		300 km	
Ford	2001	2.0 L I4	Sıkıştırılmış	1.5 kg	100 km	
BMW	2003	6.0 L	Soğuk	8 kg	200 + 480	~100
Mazda	2003	2 x 654	Sıkıştırılmış	2.4 kg	100 + 550	>30
Ford	2004	6.8 L	Sıkıştırılmış	29.6 kg	240-320	
ETEC	2004	6.0 L	Sıkıştırılmış	10.5 kg	335 km'ye	~20
Quantum	2005	1.5 L I4	Sıkıştırılmış	1.6 kg	100-130	>30

Hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlarda, yani otobüs, kamyon, otomobil, traktör ile tarım makineleri gibi tüm taşıtlarda kullanılabilmesi, sınırlı rezerve sahip petrol ürünlerinin yerini alması ve çevreye dost bir enerji olması, son yıllarda özellikle araç üreten şirketlerin büyük ilgisini çekmektedir. Benzin veya mazot yerine hidrojen gazı kullanılması ile motorların yakma sisteminde bazı değişiklikler gerekmektedir. Hidrojen yakıtlı motor tasarımlarında bugüne kadar kullanılan 3 temel yöntem aşağıda verilmiştir [6].

Hidrojen ve hava karışımı, değişmez bir oranda silindirlere giriş manifolduna verilmekte olup, motor gücü hidrojen-hava karışım miktarlarını değiştiren bir valf vasıtasıyla ayarlanmaktadır. Sistemde, özellikle yüksek hızlarda düzgün çalışmayı sağlamak için, hidrojen hava karışımına su buharı ilave edilmesi gerekebilir. İkinci yöntemde hidrojen gazı basınç altında silindirlere enjekte edilir. Havanın ise başka bir giriş manifoldu aracılığıyla ayrı olarak silindirlere geldiği için, hidrojen hava patlayıcı karışımı silindirlerin dışında oluşmaz. Bu yöntem, ilk tarif edilen sisteme göre daha emniyetlidir. Burada motor gücü, hidrojen gazı basıncını 14 atmosfer ile 70 atmosfer arasında değiştirmek suretiyle ayarlanabilir. Üçüncü yöntemde de, ikinciye benzer şekilde yine silindirlere ayrı ayrı verilen hidrojen ve hava karışımı verilmekle beraber, yüksek basınç yerine hidrojen, normal veya orta basınçta tutulur ve motor gücü, hidrojen miktarını değiştirmek suretiyle ayarlanır. Burada silindirlere giren hava tutarı değişmediğinden değişim hidrojen-hava karışımından meydana gelir. Böyle bir ayarlama hidrojen hava karışım oranının oldukça geniş bir aralıkta patlama özelliğine sahip olması nedeniyle kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Karbon içermeyen ve geleceğin temiz yakıtı olarak gösterilen hidrojenin yüksek alev hızı, geniş tutuşabilirlik sınırları, düşük ateşleme

enerjisi ve sahip olduğu yüksek oktan sayısı ile özellikle Otto çevrimine göre çalışan motorlarda kullanıma uygun bir yakıttır. Ancak, depolama ve elde edilme maliyetinden dolayı içten yanmalı motorlarda yaygın olarak kullanılamamaktadır.

Hidrojeni motora göndermek için gerekli düzenek bir hidrojen kaynağını, tankları ya da araca monteli bir işleyiciyi ve çeşitli yanma parametrelerini ölçmek için lme ekipmanını içerir. Bu proses hem buji ateşlemeli hem de sıkıştırma ateşlemeli motorlara uygulanabilir.

Buji ateşlemeli motorlar hem sıvı hem de gaz yakıtlarla çalıştırılabilir. Propan ve metan gaz ve benzin ile etanol de sıvı yakıt olarak yaygın olarak kullanılır.

Hidrojeni motora göndermek için çeşitli metotlar kullanılmıştır. Bir çalışmada hidrojen havayla karıştırılarak bir silindirde sıkıştırılıp motora gönderilmiştir [11]. Çalışmalarda gaz yakıtlar kullanılarak hidrojenin akış hızı ana yakıtınki ile eşlenir böylece istenilen hidrojenle zenginleştirme yüzdesine ulaşılır [20]. Bir motora hidrojen gönderilmesinin en st dizaynı hidrojen yüzdesini, hava fazlalık katsayısını ve aracın gaz pedali ile gazı arttırma işlemlerini optimum çalışma koşulları için ayarlayabilecek bir bilgisayarlı kontrol sistemi kullanmak olacaktır [21].

Sıkıştırma ateşlemeli motorlar standart diesel, biyodiesel ya da düz bitkisel yakıt ile çalıştırılabilirler. Bu motorların sıkıştırma prosesine hidrojen göndermek için iki seçeneği vardır. Hidrojen hava ile birlikte emme manifolduna gönderilebilir ya da diesel yakıtı benzer şekilde silindire direkt olarak enjekte edilebilir [20].

4.2 Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılmasının Avantaj ve Dezavantajları

Hidrojen yakıtlı motorların, benzinli motorlara göre birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Bunlardan biri, hidrojenli motorların yüksek verimi, diğeri, belki de en önemlisi, atık ürün olarak sadece su buharı ve azot oksitlerin açığa çıkmasıdır. Silindirleri yağlamak için kullanılan petrol ürünlerinden kaynaklanan çok az miktarda karbonmonoksit ve hidrokarbonlarla yüksek sıcaklıktan kaynaklanan azot oksitlerinde atık ürünlerin arasında yer alabileceği göz önüne alınmalıdır. Ancak, bu zararlı gazlar, petrol ürünü kullanan taşıtlara göre göz ardı edilebilecek kadar düşük düzeyde olduğu için, hidrojenli motorları tümüyle evre dostu olarak varsaymak olanaklıdır. Yanma sıcaklığını, atık su buharının bir kısmını yeniden silindire vermek suretiyle düşürmek ve böylece azot oksitlerin miktarının daha azalma olanağı vardır. İçten yanmalı motorlarda hidrojenin yakıt olarak kullanılması konusunda taşıtlarda temel sorun, hidrojenlerin güvenli olarak depolanmasıdır. Bu konuda

yapılan çalışmalarda, yine 3 ayrı yöntem geliştirilmiş olup, her birinin kendine göre üstünlükleri bulunmaktadır [20].

- Basınçlı hidrojenin, çelik tüpler içine yerleştirilerek taşınması, bugüne kadar geliştirilen birçok deneme amaçlı hidrojenle çalışan taşıtta kullanılan yöntem olmuştur. Burada görülen en büyük sorun çelik tüplerin kendi ağırlıklarıdır. Benzinli bir otomobil ortalama olarak 65 litre (47kg) benzin almakta olup, bu da enerji olarak 17 kg hidrojene karşılık gelmektedir.
- Hidrojeni sıvı olarak depolamak ağırlık sorununu çözmekle birlikte, tank hacmi ve maliyetini yükseltmektedir. Diğer bir sorun ise, hidrojenin gaz haline geçmesi ile oluşan kayıplar ve yakıt ikmali zorluğudur.
- Metal hidritler hidrojen depolamak için çok uygun bir yöntem olmasına karşın, bunlarında kendi ağırlıkları ciddi sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Daha önce belirtilen üç metal hidritten, Magnezyum-Nikel, en fazla hidrojen depolaması ve en ucuz olmasına karşın, yine ağırlık olarak taşıta 500 kg gibi bir ek yük getirmektedir. Bir diğer sorun da, hidrojen gazını belli basınç da elde edebilmek için, metal hidritin, 250°C'ye ısıtılması gereğidir. Bu sıcaklık araç çalışırken egzoz çıkışından elde edilen sıcak gazla sağlanabilmekle beraber, motorun ilk başta soğukken çalıştırılması sorun yaratmaktadır.

Bütün bu sorunlara karşın, hidrojenin özellikle, otobüs, kamyon ve traktör gibi ağır taşıtlarda kullanımı gittikçe artmakta ve gelişen teknoloji ile birlikte sorunlar giderek çözülmektedir. Petrolün sınırlı ömrü ve artan çevre kirliliği, hidrojen yakıtı kullanımının yaygınlaşmasına yol açmaktadır.

Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması konusunda birçok çalışma yapılmaktadır. Fakat bu çalışmalarda benzine göre tasarlanmış olan motorlar kullanılmaktadır ve bu motorlar hidrojen kullanımına imkan sağlayacak şekilde modifiye edilmişlerdir. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılmasına ilişkin yapılan ilk incelemelerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [6].

- Bazı küçük değişikliklerle benzin motorları hidrojen ile çalışır duruma getirilebilirler. Isıl verimleri benzin motorununkine yakındır.
- Stokiyometrik çalışma şartlarında hidrojen motorunda yüksek miktarda NO oluşur. Fakat silindirlere gönderilen karışım fakirleştirilerek NO oluşumu azaltılabilir.

- Benzin motorundan hidrojen motoruna çevrilmiş motorda, stokiyometrik hidrojen-hava karışımında %20 güç kaybı meydana gelir.
- Karbüratörlü motorlarda emme manifoldundaki alev tepmesi önemli bir problemdir.

Hidrojen motorunun bu dezavantajları, onun benzin motoru ile rekabet etme şansını azaltmaktadır. Fakat günümüze kadar yapılan çalışmalar ile bu problemler çözülerek, hidrojenin motor verimine ve hava kirliliğinin azaltılmasına olan katkıları görülmüştür. Hidrojenin sıkıştırma oranı yüksek olan motorlarda kullanılması ile de sebep olduğu güç kaybı azaltılabilir. Ayrıca aşırı doldurma uygulanarak ilave güç sağlanabilir. Sıkıştırma oranının artırılması ve fakir karışım ile hidrojen motorunun ısıl veriminde, benzinli motora göre %25'lik bir artış sağlanabilir. Fakir karışım ile alev tepmesi önemli miktarda azaltılır. Akaryakıt motorlarında görülen buhar tıkaçı, soğuk yüzeylerde yoğuşma, yeterince buharlaşmama gibi sorunlar hidrojen motorlarında yoktur. Hidrojen motorları 20,13 K' de (253°C) ilk harekete geçerken bile sorun çıkarmaz [6].

Benzin motoruna hidrojen takviyesi ile yanmamış hidrokarbon emisyonları azaltılarak ısıl verim iyileştirilir. Hidrojen takviyesi yapılan Otto motorlarında küçük bir ön yanma odası mevcuttur. Yanma odası bujinin yerine yerleştirilmiştir. Bu ön yanma odası içinde hidrojen enjektörü ile buji vardır. Esas yakıt ise (benzin, metanol, propan vs.) emme portlarındaki enjektörlerden püskürtülerek silindirlere gönderilir. Hidrojen takviyesi ile esas yanma odası içinde yakılan hidrokarbon esaslı yakıtların çok fakir karışım oranlarında düzgün bir şekilde yakılması sağlanır. Böylece ısıl verim artırılarak, azot oksit emisyonları önemli derecede azaltılır [5].

Hidrojenin hava ile yanmasının sonucu da, yakıtta karbon bulunmaması nedeni ile yanma ürünleri arasında CO, CO, HC'ler mevcut olmayacak, sadece motorun yağlama yağının yanması nedeni ile oluşan HC'ler egzoz gazları arasında bulunacaktır. Ayrıca yüksek yanma sıcaklıkları nedeniyle havanın kimyasal reaksiyonu sonucu azot oksitler oluşacaktır [1].

Hidrojenin yanma ürünü su buharıdır ve sınırlı maksimum sıcaklıklardaki NO emisyonları ihmal edilebilir. Nitekim hidrojenle çalışan bir içten yanmalı motor, günümüz taşıt motorlarından çok daha az NO_x emisyonuna neden olmaktadır [6].

Hidrojen, aynen klasik içten yanmalı motorlarda kullanılan; benzin, dizel yakıtı, LPG, doğalgaz ve kerosen gibi içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilir. Yakıt içerisindeki kimyasal bağ enerjisi yanma sonrası ısıya ve buradan da mekanik enerjiye dönüştürülmektedir.

Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığının yüksek oluşu (1 Atm basınçta 847-867 K) ve oktan sayısının yüksekliği hidrojenin dizel motorlardan çok, Otto motorlarda daha uygun bir yakıt olacağını göstermektedir.

Hidrojen yakıtlı motorlarda, fosil yakıtlarda görülen buhar tıkaçı, soğuk yüzeylerde yoğuşma, yeterince buharlaşmama, zayıf karışım gibi sorunlar yoktur.

Hidrojenin difüzyon katsayısının yüksek olması ve doğadaki en küçük moleküle sahip element olması, havayla mükemmel karışım oluşturmasını sağlamakta ve motorlarda ön karışım oluşturma gereksinimini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, geniş tutuşabilirlik aralığı, düşük ateşleme enerjisi ile Otto motorları için oldukça uygun bir yakıttır [6].

Hidrojenin ek yakıt olarak benzinli motorlarda ufak modifikasyonlarla kullanılması, yakıt pili ve elektrikli sistemlere göre; ilk yatırım maliyeti, işletme maliyeti, boyut ve ömür açısından oldukça elverişlidir. Ancak ticari yönden verimleri yakıt pilli sistemlerden daha düşüktür.

Hidrojenin alt ısı değeri kütleli olarak ele alındığında yakıtlar arasında en yüksek olmasına karşın hacimsel olarak ele alındığında, hidrojenin ısı değerinin diğer yakıtlara nazaran çok düşük olduğu görülecektir. Bu durum, yakıt olarak benzin kullanan aynı silindir hacmine sahip bir motorla kıyaslandığında hidrojen motorundan alınabilecek maksimum gücü sınırlar. Hidrojenin motorlarda kullanılmasındaki bir diğer sorun ise, hacimsel olarak enerji yoğunluğunun düşük olması nedeniyle, yüksek devirlerde açığa çıkan moment düşüklüğüdür.

Hidrojenin alev hızının yüksek olması Otto motorlarında ideale yakın bir yanma oluşmasını sağlarken, oktan sayısının yüksek olması da, sıkıştırma oranının artırılmasına olanak sağlamaktadır. Tüm bu özellikler beraberinde termik verimin de artmasına neden olmaktadır [22]. Ancak, tüm bu olumluluklara rağmen hidrojenin yüksek yanma hızından dolayı oluşan ısı kayıpları, termik verimde az bir artışa neden olmaktadır [5].

Sahip olduğu bu yüksek alev hızı, otto motorlarda ideale yakın bir yanma ve ısı verimde artışlar sağlar. Ayrıca düşük alev parlaklığı ile yanyor olması radyasyon yoluyla gerçekleşen ısı transferi miktarını da azaltmaktadır. Hidrojen yakıtlı motorun ısı verimi benzin motorununkine oldukça yakındır. Hatta sıkıştırma oranının artırılması ve fakir karışım sağlanmasıyla ısı verimde % 25'lik bir artış sağlanabildiği tespit edilmiştir. Hidrojen-hava karışımını ateşlemek için gerekli enerji miktarı da diğer yakıtlara oranla çok düşüktür ve bu da tutuşma garantisini sağlayarak özellikle benzinli motorlarda bir avantaj oluşturmaktadır. Yanma sonunda fosil yakıtlarda söz konusu olan CO, CO₂, C_nH_m, NO_x vb. zehirli ve zararlı atıklardan yalnızca NO_x 'in oluştuğu hidrojenli motorlarda bu emisyonun miktarı da karışım oranının ayarlanmasıyla azaltılabilmektedir. Hidrojenin yanması sonucu partikül madde

oluşmadığından bujiler de kirlenmez. Dolayısıyla hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlarda yalnızca NO_x ve su oluşmaktadır. Genellikle NO_x hava fazlalık katsayısı ve karışım yerel sıcaklığına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden zengin ($\lambda < 0,9$) ve fakir ($\lambda > 1,7$) karışımlarda NO_x oluşumu önemli ölçüde azalacaktır.

4.3 İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojen Kullanımının Ortaya Çıkardığı İşletim Problemleri

Hidrojenin motorlarda direkt yakıt olarak kullanılması bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Yüksek yanma hızı ve tutuşturma enerjisinin çok düşük olması özellikle yüksek güçte çalışma koşullarında; vuruntu, erken ateşleme ve emme manifoldundan alev tepmesi gibi yanma problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bazı araştırmacılar silindir içerisine hidrojeni direkt püskürtme ile bu tür istenmeyen problemlerin üstesinden gelmişlerdir [17].

Hidrojenin alt ısıl değeri kütleli olarak ele alındığında oldukça yüksektir; ancak hacimsel olarak alt ısıl değeri diğer yakıtlara göre oldukça düşüktür. Bu özellik hidrojenli motorlarda alınabilecek maksimum gücü sınırlamaktadır. Hidrojenin yanma odasına direkt ve daha yüksek basınçta püskürtülmesiyle bu sorunun üstesinden gelinebilir.

Hidrojen yakıtlı motorlarda yanma açısından ortaya çıkan en önemli iki sorun, geri tutuşma ve erken ateşleme olaylarıdır. Yanma odasına gönderilen yakıt hava karışımının silindire girmeden önce tutuşması sonucunda motorun emme manifoldu içinde geriye doğru alevin ilerlemesi geri tutuşma olarak tanımlanmaktadır. Bu olay emme sistemi elamanlarını tahrip etmekte ve emniyet açısından sorun oluşturmaktadır. Yanma odasına gönderilen karışımın bujide kıvılcım çakmadan önce sıcak odaklar tarafından tutuşturularak yanmayı istenilenden önce başlatması da erken tutuşma olarak tanımlanmaktadır. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması bu iki sorunu ortaya çıkarmaktadır [6]. Geri tutuşma hava fazlalık kat sayısının (λ) 2 ila 3 arasında olduğu durumlarda oluşmaktadır. Hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi için bu sorunların ortadan kaldırılması gerekir.

Yüksek yük altında, yanma odasındaki sıcak noktalar karışımın erken ateşlenmesine sebep olur. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması nedeniyle; yanma odasındaki sıcak noktalar, supap bindirmesinde sıcak egzoz gazları, çok fakir karışımlarda yanma hızlarının düşük olması nedeni ile yanma süresinin artması sonucu yanan gazlarla yeni karışımın teması, motor yağından gelen sıcak partiküller, yanmayı istenilenden önce başlatabilmektedir. Bu amaçla yanma odası sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için; Karışımın bir miktar

fakirleştirilmesi, egzoz gazları resirkülasyonu (EGR), yanma odasına su püskürtülmesi, supap bindirmesi süresinin azaltılması, giriş havasının sıvı hidrojen kullanımı sonucu soğutulması gibi çeşitli yöntemler uygulanabilir. Ancak karışıma EGR uygulanması veya gönderilen hidrojenin azaltılması sonucu fakirleştirilmesi çevrimden çevrime olan farklılıkları artıracak ve motorun düzenli çalışmasını önleyecektir. Ayrıca EGR sonucu ortalama efektif basınç da düşecektir [6]. Hidrojen yakıtlı motorlarda hava-yakıt oranı 0,8 olduğunda egzoz gazları içindeki NO miktarı maksimum olur. NO oluşumunu azaltmak için hidrojene saf oksijen ilave edilmelidir. Bu durum ise sistemi daha karmaşık hale getirir ve taşıt ağırlığını arttırır. Bu sorunun çözümü için kullanılan yöntemlerden biri; taşıt üzerinde suyu elektroliz ederek, açığa çıkan hidrojen ve oksijenin basınç altında depo edilmesidir [18].

Hidrojen-hava karışımı içindeki su buharı yanma sıcaklığını azaltacağından maksimum basıncın, dolayısıyla gücün azalmasına sebep olur. Bunun için karışım içindeki su buharı bir yoğuşturucudan geçirilerek su deposuna geri döndürülür. Yanma odası içinde bırakılan su buharı miktarı ayarlanarak yanma hızı ve vuruntu oluşumu kontrol edilebilir [6].

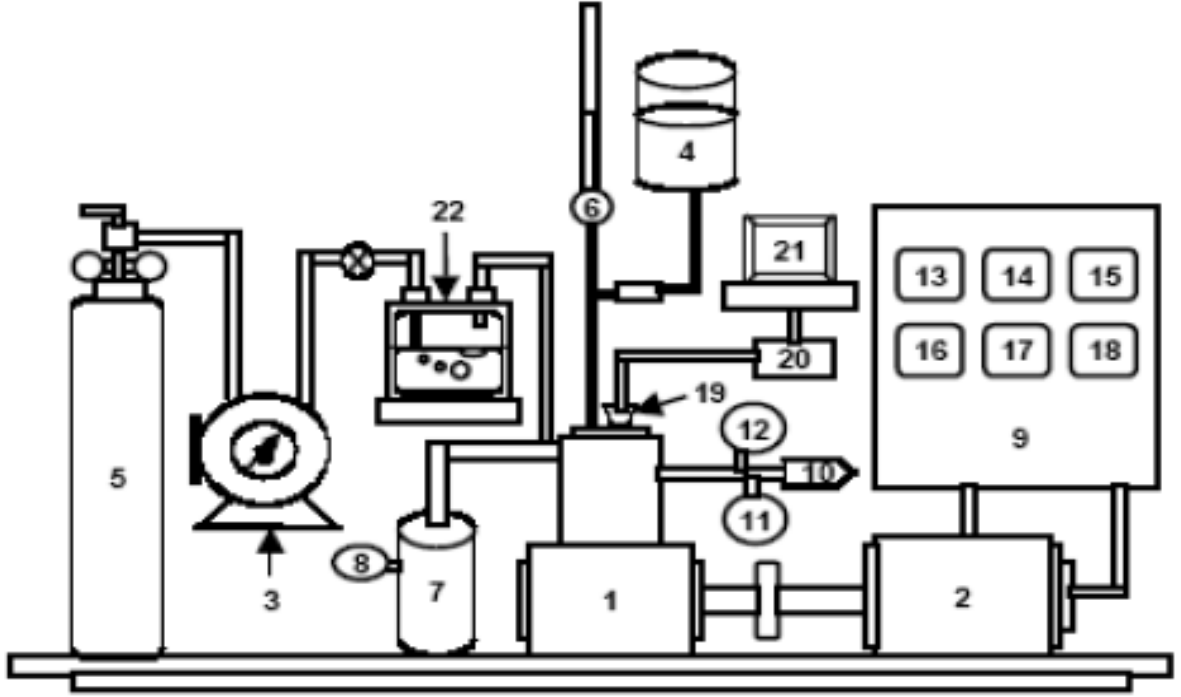
İÇTEN YANMALI MOTORLARDA HİDROJEN KULLANILMASI KONUSUNDA ÖNCEDEDEN YAPILAN ÇALIŞMALAR

İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak hidrojenin kullanılabilirliği ve dezavantajlarının ortadan kaldırılması yönünde birçok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların büyük bir kısmı karbürasyonlu sistemler üzerinde, bir kısmı da yanma karakteristiklerini iyileştirmek adına ek yakıt olarak kullanımı yönünde yapılmıştır. Elektronik kontrol sistemlerinin kullanılmaya başlanmasıyla birlikte araştırmacılar ve otomobil üreticileri hidrojenin kullanımı yönündeki çalışmalara hız vermişlerdir. Motor yakıtı olarak hidrojenin kullanılmasında hala sorunlar olmasına rağmen, son yıllarda hidrojenin üretimi, depolanması ve dağıtımı üzerine yapılan çalışmalar umut vericidir.

Bu çalışmalardan biri de Idaho Üniversitesi Biyoloji ve Ziraat Mühendisliği Departmanı öğretim görevlisi Jacob Wall'un yaptığı çalışmadır [23]. Hidrojenle zenginleştirilmiş hidrokarbon yanmasının emisyonlar ve performansa etkilerini araştıran Jacob Wall, araştırmasında bu yanma modunun prensibini sıkıştırma ya da buji ateşlemeli motorlarda yanma reaksiyonlarına bir miktar hidrojen gazı eklemek olarak belirtmiştir. Çalışmalar hidrokarbon yakıtının %5-10'u kadar az miktarlarda eklenen hidrojenin hidrokarbon yakıtı kullanımını azaltabildiği görülmüştür. Bu konunun arkasındaki teori ise hidrojen eklenmesinin fakir çalışma aralığını genişletebilmesi, fakir yanma özelliğini iyileştirebilmesi ve yanma süresini azaltabilmesidir.

Wall'a göre bu metodu bir motora uygulamak için bir hidrojen kaynağı gereklidir. Şu anda en basit seçenek bir hidrojen tankı taşımak olmaktadır. Araç hidrokarbon yakıt kaynağından hidrojen oluşturmak ya da hidrojeni suyun elektrolizinden üretmek üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Gelecekte araç içinde hidrojeni depolamak ya da araç üzerinde hidrojen üretimi için daha iyi yöntemler geliştirilebilir.

Araştırmasının uygulama kısmında Jacob Wall; Şekil 5.1’de görüleceği üzere deney düzeneği ve deneyin yapılışının yanısıra hidrojenle zenginleştirilmiş yanma, ateşleme tipleri ile hidrojen üretim yöntemlerine de değinerek önceden yapılan bazı çalışmalardan bahsedip güncel örneklere de yer vermiştir.



AÇIKLAMALAR

- | | | |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Motor | 9. Dinamometre Paneli | 17.Yağlama Yağı Sıcaklık Göstergesi |
| 2. Dinamometre | 10. Susturucu | 18. Rotametre |
| 3. Gaz Akış Ölçeri | 11. Duman Pompası | 19. Basınç Sensörü |
| 4. Diesel Tankı | 12. HC/CO Analizörü | 20. Yük Yükseltici |
| 5. Hidrojen Tüpü | 13. Kronometre | 21. DDA. Sistemi |
| 6. Büret (Diesel) | 14. Devir/dak Göstergesi | 22. Alev Perdesi |
| 7. Hava Tankı | 15. Çıkış Sıcaklığı Göstergesi | |
| 8. Hava Akış Ölçeri | 16.Soğutucu Sıcaklık Göstergesi | |

Şekil 5.1 Jacob Wall'un örnek düzeneği [23]

Jacob Wall, içten yanmalı buji ateşlemeli Otto motorunun yanma prosesine hidrojeni ek yakıt olarak göndererek yaptığı deneysel çalışmanın bitiminde aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır. Görülmüştür ki yanma prosesine hidrojen göndermek;

1. Isıl verimi arttırır ve yakıt tüketimini azaltır.
2. Karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarını azaltır.
3. Doğru zamanlama ve karışım ayarlaması yapılmazsa NO_x emisyonlarını arttırır.
4. Hidrojeni ek yakıt olarak kullanmanın zorluğu hidrojenin depolanması ve üretimidir.
5. Verimsiz diye gözden çıkarılmadan önce yanmayı zenginleştirmek için hidrojen üretiminde suyun elektrolizini kullanmak deneysel olarak araştırılmalıdır.

Bir diğer göze batan çalışma fakir karışım şartlarında buji ateşlemeli motora hidrojen eklenmesinin yanma, emisyonlar ve performansa etkilerini incelemek amacıyla Ji Changwei ile Wang Shoufeng tarafından Çin'in Pekin Teknoloji Üniversitesi Çevre ve Enerji Mühendisliği Bölümü'nde yapılan deneysel çalışmadır [24]. Deneysel çalışmada, hidrojen port enjeksiyonunu gerçekleştirmek için emme manifoldlarına bir hidrojen enjeksiyon sisteminin eklendiği modifiye edilmiş bir 1.6 L buji ateşlemeli motorda yapılmıştır. Hidrojen ve benzinin enjeksiyon zamanlamaları ve süreleri, geliştirilen bir ECU aracılığı ile hat üzerinden ayarlanabilmektedir. Motor 1400 d/d, 61.5 kPa MAP ile çalışmaktaydı ve ateşleme zamanlaması üst ölü noktadan önce 22° KMA'da tutulmuştur. Başlıca sonuçlar aşağıdadır:

1. Hava fazlalık katsayısı stokiyometrik şartlara yakınken, hidrojen ekleme oranının artması ile Bmep azalır. Fakat motor fakir şartlar altında çalışırken hidrojen eklenmesi Bmep'in artmasına yardımcı olur.
2. Motor fren termal verimliliği ve maksimum fren termal verimliliği için ilgili hava fazlalık katsayısı hidrojen eklenmesi ile artar. Pik fren termal verimi orijinal benzinli motordaki %26.37 değerinden %6 hidrojen eklenti oranında hidrojenle zenginleştirilmiş benzinli motorda %31.56 değerine çıkmaktadır.
3. Hidrojen eklenmesi ile maksimum silindir sıcaklığı ile pik silindir basıncı artarken, alev büyüme ve yayılma süreleri azalmaktadır. Bunun yanında hidrojen eklenmesi ile beraber özellikle fakir şartlarda çevrimsel değişimler de etkili bir şekilde iyileştirilmiştir.
4. HC ve CO₂ emisyonları hidrojen karışım seviyesinin artması açık bir şekilde azalır. Hava fazlalık katsayısı stokiyometrik değere yakın olduğunda hidrojen eklenmesi ile

CO emisyonları artar, fakat fakir şartlarda altında hidrojen eklenmesi ile beraber azalır. Artan silindir sıcaklığından dolayı, aynı hava fazlalık katsayılarında hidrojen oranının artmasıyla NO_x emisyonları açık bir şekilde artar.

Üçüncü bir çalışma R. Hari Ganesh, V. Subramanian, V. Balasubramanian, J.M. Mallikarjuna, A. Ramesh ve R.P. Sharma tarafından Hindistan'da Madras Hint Teknoloji Üniversitesi'nde makine mühendisliği bölümü içten yanmalı motor laboratuvarında gerçekleştirilmiştir [25]. Bu çalışmada, tek silindri geleneksel bir buji ateşlemeli motor, zamanlı valf yakıt enjeksiyon tekniği kullanılarak hidrojenle çalışacak şekilde modifiye edilmiştir. Belirlenen zamanda hidrojeni emme valfine enjekte etmek için bir selenoid ile çalışan gaz enjektörü kullanılmıştır. Enjeksiyon zamanlaması ve süresini kontrol etmek için bu çalışma için özel geliştirilmiş bir elektronik devre kullanılmıştır. Ateşleme zamanı en iyi maksimum tork (MBT) için ayarlanmıştır. Motor tam açık gaz kolu durumunda çalıştırılmıştır. Sonuçları karşılaştırmak amacıyla aynı motor aynı zamanda benzinle de çalıştırılmıştır.

Hidrojen ve benzinin performans ve emisyon karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan, hidrojenle çalışmada motorun pik güç değerinde %20'lik bir düşüş olduğu görülmektedir. Hidrojenle çalışmada fren termal verimi benzinle olandan %2 daha fazladır. Fakir limit yakıt fazlalık katsayısı değeri hidrojenle 0.3 ve benzinle 0.83 olarak elde edilebilir. Hidrojenle çalışmada CO, CO₂ ve HC emisyonları göz ardı edilebilir. Fakat, hidrojenle çalışmada tam yük kuvvetinde NO_x emisyonları benzinle çalışmadakinden dört kat daha fazla çıkmıştır. Hidrojen için en iyi ateşleme zamanı benzine göre çok sonraydı. Hidrojen enjeksiyon basıncının etkisi de araştırılmıştır ve herhangi bir belirgin değişim gözlenmemiştir.

Irak'ta Babil Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim görevlisi Maher Abdul-Resul Sadiq Al-Baghdadi, ek yakıt olarak hidrojen ile birlikte dört stroklu bir buji ateşlemeli motorda etil alkol kullanılmasını performans yönünden analiz eden bir çalışma yapmıştır [26]. Dört stroklu buji ateşlemeli bir motorun performans ve kirletici emisyonlarına hidrojen/etil alkol eklenmesi miktarının etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın sonuçları, benzinli buji ateşlemeli motorun hidrojen ve etil alkolün beraber eklenmesi ile çalıştığı zamanlarda bütün motor performans parametrelerinin iyileştiğini göstermiştir. Alkol eklenmesinin önemli iyileştirmeleri yüksek yararlı sıkıştırma oranı ve hidrojen destekli motorun çıkış gücündeki artışla NO_x emisyonunun düşmesidir. 9 sıkıştırma oranı ve 1500 d/d'da çalışan bir benzinli motora hacmin %30'u kadar etil alkol ve kütlelerin %8'i kadar hidrojen eklenmesi CO emisyonlarında %48.5, NO_x emisyonlarında %31.1, ve özgül yakıt sarfiyatında %58.5 değerlerinde azalma sağlamıştır.

Bunun yanısıra, motor termal veriminde %10.1 ve çıkış gücü %4.72 artmıştır. Etil alkol %30'un üzerine çıkarıldığında yakıtın buharlaşmamasından kaynaklı dengesiz motor çalışmasına neden olur ve bu durum da hem fren kuvvetinde hem de verimde düşüğe neden olmaktadır.

Kyoto Üniversitesi Enerji Bilimleri Yüksek Okulu ve Toyota işbirliği ile buji ateşlemeli hidrojen motorunun performans ve yanma karakteristiklerini inceleyen bir çalışma yapılmıştır. Ali Mohammadi, Masahiro Shioji, Yasuyuki Nakai, Wataru Ishikura ve Eizo Tabo bu çalışmada iç karışım metodu uygulayarak hidrojenin avantajlarından tam olarak yararlanmaya dikkat etmiştir [27]. Hidrojen, yüksek basınçlı bir gaz enjektörü kullanılarak tek silindirli test motorunun silindirine direkt enjekte edilmiştir ve geniş motor yükleri altında motor performansı ve NO_x emisyonuna enjeksiyon zamanlaması ve tutuşma zamanlamasının etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, hidrojenin direkt enjeksiyonunun geri tepmeyi önlediği ve sıkıştırma stroğunun sonunda hidrojen enjesiyonu ile yüksek termal verim ve çıkış gücünün elde edilebildiğini göstermiştir. Dahası, her motor yükü için enjeksiyon zamanının daha ileri optimizasyonu ile yüksek motor çıkış koşullarında NO_x emisyonları düşürülebilmektedir.

F. Yüksel ve M.A. Ceviz Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde ek yakıt olarak hidrojen kullanan bir buji ateşlemeli motorun termal dengesini incelemiştir [28]. Bu çalışma buji ateşlemeli motorun termal dengesi ve performansına benzin-hava karışımına sabit miktarda hidrojen eklemenin etkilerini incelemektedir. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bir dört stroklu, dört silindirli buji ateşlemeli motor kullanılmıştır.

Motor termal verimi, egzoz gazları ile ısı kaybı, soğutma suyundan ısı kaybı ve hesaplanmamış kayıplar (örnek; yağlama yağı ile ısı kaybı, radyasyon) için termal denge testleri yapılırken performans testleri ise fren kuvveti, özgün yakıt sarfiyatı ve hava oranı için yapılmıştır. Hidrojen takviyeleri üç farklı ve sabit kütle akış oranlarında kullanılmıştır. 0.129, 0.168 ve 0.208 kg sa⁻¹ kütle akış oranları yaklaşık dörtte üç gaz kolu açıklığı pozisyonunda ve 1000 ile 4500 d/d arasında değişen motor hızlarında denenmiştir. Sonuçlar; hidrojenin benzine ek yakıt olarak kullanılmasının hesaplanmamış kayıpları ve soğutma suyuna olan kayıpları azalttığını ve de egzoz gazından olan ısı kaybının saf benzin deneyleriyle neredeyse aynı olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak özgün yakıt sarfiyatı düşerken motor termal verimi ile hava oranı artmaktadır. Termal verim ve özgün yakıt sarfiyatı gibi motor performans parametreleri benzininkine göre hidrojen kütle akış oranının yüzde olarak seviyesini %5 arttırmıştır.

İngiltere Newcastle Üniversitesi'nde Sir Joseph Swan Enerji Araştırma Enstitüsünde J.M. Gomes Antunes, R. Mikalsen ve A.P. Roskilly tarafından yürütülmüş olan direkt enjeksiyonlu sıkıştırma ateşlemeli bir hidrojen motorunun deneysel araştırması hidrojen yakıtlı motorlar konusunda buji ateşlemeli olanlara göre alternatif bir kaynak olarak öne çıkmaktadır [29]. Bu çalışma, hidrojen yakıtı ile direk enjeksiyon modunda bir Diesel motorun denenmesi için deneysel bir düzeneğin geliştirilmesini anlatmaktadır. Test sonuçları, geleneksel Diesel yakıtla çalışmaya göre bir Diesel motorda hidrojenin direk enjeksiyon ile kullanımının daha yüksek bir güç/ağırlık oranı verdiğini ve pik gücün yaklaşık %14 daha fazla olduğunu göstermiştir. Hidrojenle çalışan motor için yeterli yanmayı sağlamak adına emme havasının ısıtılması gerekmiştir ve silindir içi gaz basıncı pik değerinde büyük bir artış gözlemlenmiştir. Diesel yakıtı kıyasla hidrojen kullanımında belirgin bir verim avantajı görülmüştür. Geleneksel Diesel yakıtlı moddaki %28'lik yakıt verimine karşılık hidrojen yakıtlı motorda %43'lük yakıt verimine ulaşılmıştır. Azot oksit emisyon oluşumunda yaklaşık %20'lik bir düşüş de gözlemlenmiştir.

Belçika'nın Gent Üniversitesi'nde ulaşım teknolojileri üzerine çalışmalar yapan Roger Sierens ve Sebastian Verhelst, hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlar hakkında oldukça geniş çaplı araştırmalar yapan bilimcilerdir. Deneysel anlamda ileri seviyede araştırmalar yapmışlardır [30]. Bunlardan bir tanesinde ise hidrojen motoru ile çalışan bir şehir içi ulaşım otobüsü prototipi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Ghent Üniversitesi ulaşım teknolojileri laboratuvarı bir GM/Crusader V-8 motorunu hidrojenle kullanım için dönüştürmüştür. Motor optimize edildiğinde halk gösterimi için alçak zeminli orta boyutlu bir hidrojenli şehir otobüsüne yerleştirilecektir.

Yanma prosesinin tam kontrolü ve geri tepmeye (hava-yakıt karışımının emme manifoldunda patlaması) direnci arttırmak için bir sıralı zamanlı çok noktalı enjeksiyon ve bir elektronik kontrol sistemi seçilmiştir. Sonuçlar motor parametrelerinin (ateşleme zamanlaması, enjeksiyon zamanlaması ve süresi, enjeksiyon basıncı) bir fonksiyonu olarak verilmiştir.

Hidrojenin yakıt olarak kullanımı ile ilgili; yanma karakteristikleri (elektrot uzaklığının önemi), yağlama yağı kalitesi (yüksek oranda hidrojen içeren motor karter gazları), oksijen sensörleri (çok fakir çalışma şartları), gürültü azaltma (emme borularının düzenlenmesi ve uzunluğu) gibi konulara özel ilgi verilmiştir. Sadece hava yakıt oranına göre bir güç regülasyonunun bir gaz kolu regülasyonu (normal benzin ya da gaz regülasyonu) karşısındaki avantaj ve dezavantajları gözlemlenmiştir.

Sonunda motorun geliştirilmesindeki amaçlar olan 90 kW güç çıkışı, 300 Nm tork, çok düşük emisyon seviyeleri ve geri tepmesiz çalışma koşullarına ulaşılmıştır.

İran, Tahran'daki K. N. Toosi Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü adına Farhad Salimi, Amir H. Shamekhi ve Ali M. Pourkhesalian tarafından yürütülen bir araştırma çalışması hidrojen yakıtlı motorların performans ve emisyonlarına karışım zenginliği, ateşleme zamanı ve valf zamanlaması gibi faktörlerin etkisini incelemiştir [31]. Bu çalışmada bir buji ateşlemeli hidrojenle çalışan motorun yarı boyutlu iki bölgeli termodinamik modeli geliştirilmiştir. Modellenmiş motorun sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel verilerle simülasyon verileri birbirine yeterince yakındır. Bu nedenle modelde kullanılan formülasyonlar ve metotlar değerlendirilmiştir. Daha sonra model, motor emisyon ve performans karakteristiklerini tahmin etmek için bir motor simülatörü olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmada aynı zamanda hidrojen motorunun ateşleme avansı değişimine hassasiyeti, Hava/Yakıt oranı ve valf zamanlaması araştırılmıştır. Bahsi geçen parametrelerin önemi ve etkinlikleri gösterilmiştir. Hidrojen motorunun $\phi=0.8$ 'e yakın noktada en fazla NO_x konsantrasyonuna sahip olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda SA etkisi, yüksek hidrojen alev hızından dolayı çok az avans [-5 0] gerekmesinden dolayı araştırılmış ve gözlemlenmiştir. Valflerin açılmasındaki, açılma zamanındaki ve açık kalma süresindeki değişim araştırılmıştır ve bunların etkileri tamamen ele alınmıştır. Valf zamanlaması çalışmaları aynı zamanda VVT mekanizmalarına da uygulanabilir.

Biyogaz yakıtlı buji ateşlemeli bir motora ek yakıt olarak hidrojen eklenmesinin etkileri, Hindistan'ın Madras Hint Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü tarafından araştırılmıştır. Hidrojen biyogaza küçük miktarlarda (enerji bazında %5, %10 ve %15 olarak) eklenmiştir ve performansa, emisyonlara ve yanmaya etkilerini incelemek amacıyla bir buji ateşlemeli motorda sabit hızda farklı yakıt fazlalık oranlarında test edilmiştir [32]. Hidrojen yanma oranını belirgin bir şekilde iyileştirir ve biyogazın fakir yanma limitini genişletir. Fren termal veriminde ve fren kuvvetinde bir gelişme meydana gelmektedir. Fakat, %15 hidrojen oranından sonra vurutuyu kontrol etmek için ateşleme zamanını geciktirilme ihtiyacı yüksek yakıt fazlalık oranlarında iyileştirme sağlamamaktadır. Hidrokarbon seviyelerinde belirgin düşüşler görülmüştür. Karbon dioksit ve geciktirilmiş ateşleme zamanlaması kullanımından dolayı azot oksit emisyonlarında bir artış olmamıştır. Ateşleme zamanlamasının vurutuyu önlemek için geciktirilmesi nedeniyle pik basınçlar ve ısı salınım oranları hidrojen eklenmesiyle düşer. Yanmada ve fakir karışımlarda çevrimden çevrime değişimlerde bir

azalma görülmektedir. Tüm bu çalışmalardan sonra %10'luk hidrojen eklentisinin en uygunu olduğu sonucuna varılmıştır.

6.1 Giriş

Önceki çalışmalar kısmında da belirtildiği üzere içten yanmalı motorlarda yakıt olarak hidrojenin kullanılabilirliği ve dezavantajlarının ortadan kaldırılması yönünde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların büyük bir kısmı karbürasyonlu sistemler üzerinde, bir kısmı da yanma karakteristiklerini iyileştirmek adına ek yakıt olarak kullanımı yönünde yapılmıştır. Elektronik kontrol sistemlerinin kullanılmaya başlanmasıyla birlikte araştırmacılar ve otomobil üreticileri hidrojenin kullanımı yönündeki çalışmalara hız vermişlerdir. Motor yakıtı olarak hidrojenin kullanılmasında hala sorunlar olmasına rağmen, son yıllarda hidrojenin üretimi, depolanması ve dağıtımı üzerine yapılan çalışmalar olumlu yönde ilerlemektedir.

Araştırmacıların ve otomotiv üreticilerinin üzerinde yoğunlaştığı bir diğer konuda hidrojenin hibrit araçlarda yakıt pillerinde kullanımınıdır. Günümüzde hibrit taşıtlar ticari olarak piyasada bulunmalarına karşın, yakıt pili teknolojisinin pahalı olması, gerekli hidrojenin depolanma zorunluluğu, elektrik motoru batarya ve yakıt pili sisteminin taşıt ağırlıklarını arttırması ve ilk yatırım maliyetleri vb. faktörler, hibrit ve elektrikli taşıtların yaygınlaşmasında engel teşkil etmektedirler.

Hidrojenin elektronik düzenlerle ve ufak değişikliklerle günümüz içten yanmalı motorlarında kullanılması; ilk yatırım maliyeti, boyut ve ömürleri açısından diğer pek çok sisteme göre daha elverişlidir.

İçten yanmalı motorlarda hidrojenin ek yakıt olarak kullanılması amacıyla piyasaya sürülmüş elektrolizörlerin avantajları, ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin çok düşük olması ve üretilen hidrojenin depolanma ihtiyacının bulunmamasıdır [33].

Bu uygulama çalışmasının amacı, hidrojenin ek yakıt olarak içten yanmalı motorlarda efektif olarak kullanılabilirliğini, motor performansı üzerindeki etkileri ve sağlayabileceği faydaları

belirlemektir. Yapılan çalışmada, esas enjeksiyon miktarına ek olarak farklı oranlarda silindir içersine hidrojen-oksijen karışımı gönderilerek motor performansı ve emisyonlardaki değişimler belirlenmiş ve elde edilen deney sonuçları benzinle karşılaştırılmıştır. Elektroliz işlemi için gerekli enerji ilk olarak dışarıdan bir güç kaynağı yardımı ile, daha sonra motorun üzerindeki alternatörden güç çekilerek sağlanmış ve bu iki farklı prosesin sonuçları irdelenmiştir.

6.2 Deney Seti ve Deneyin Yapılışı

Çalışmada kullanılan deney motoru, Yıldız Teknik Üniversitesi Motorlar Laboratuvarında bulunan 10,2:1 sıkıştırma oranına sahip 1.1 lt hacimli Peugeot marka motordur. Çizelge 6.1’de motorun özellikleri görülmektedir. Yükleme düzeni olarak maksimum 112 kW yükleme kapasitesine sahip servo motor kontrollü hidrokinetik yükleme düzeni kullanılmıştır.

Ek yakıt olarak kullanılan hidrojen, piyasada ticari olarak satılmakta olan ve araç elektrik sistemi üzerinden beslenen ve suyu elektroliz yöntemiyle oksijen ve hidrojene ayırıştıran 1000 ml/dak. hidrojen üretim kapasitesini destekleyen bir elektrolizörden temin edilmiştir.

Dünyada ticari olarak yaygınlaşmış PEM tipi elektrolizörlerin verimleri %80 civarındadır. Bu çalışmada kullanılan elektrolizör alkalın tip olup verimi yaklaşık %40’tır. Genel elektrolizör özgül enerji harcamı formülü aşağıdaki gibidir [33]:

$$\text{Elektrolizör Özgül Enerji Harcamı} = \frac{\text{Hidrojenin Üst Isıl Değeri}}{\text{Elektrolizör Isıl Verimi}} \quad (9.1)$$

Bu durumda deney elektrolizörü ile 1 kg hidrojen üretmek için gereken enerji, hidrojenin üst ısıl değerinin 140.9 MJ/kg ve elektrolizör veriminin 0,40 olduğu bilindiğinden 352.25 MJ/kg olarak hesaplanmıştır. Yaklaşık 20°C ve 1 atm’deki laboratuvar koşullarında hidrojen gazının yoğunluğu 0,082 kg/m³ olduğuna göre kütle hacme oranının yoğunluğu verdiği göz önüne alınarak doğru orantı yardımıyla 1 lt hidrojen üretmek için elektrolizörde harcanması gereken enerji 28,8845 kJ/lt olarak hesaplanmıştır.

Elektrolizörden elde edilen H₂ ve O₂ karışımı emme manifoldundan silindir içersine gönderilmektedir. Elektroliz için kullanılan çözelti potasyum hidroksit (KOH) kullanılarak hazırlanmıştır. Üretilen H₂ miktarını kontrol etmek için elektrolizör besleme akımını kontrol eden bir elektronik kontrol ünitesi (PWM ünitesi) kullanılmıştır.

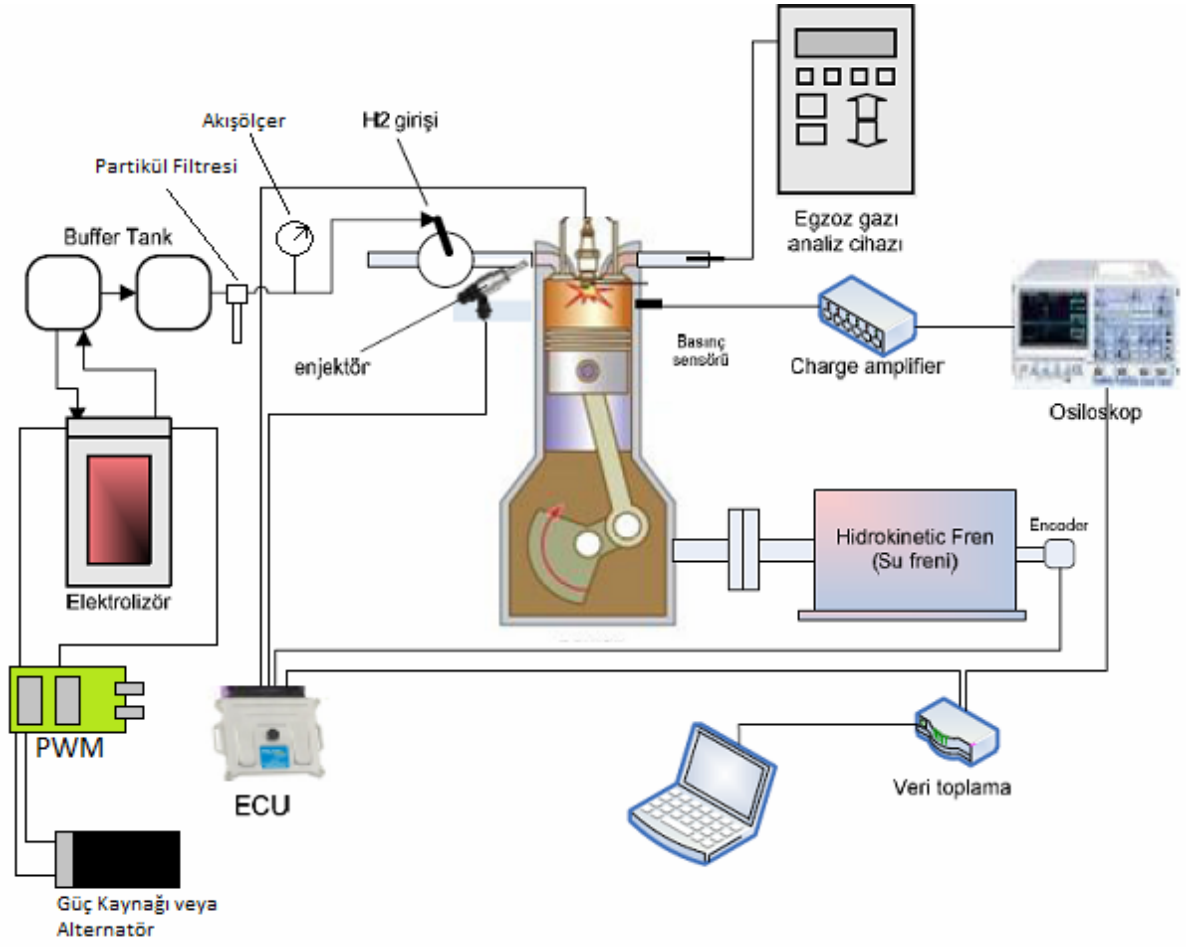
Çizelge 6.1 Deney motorunun özellikleri

Silindir Çapı (mm)	72
Piston Stroku (mm)	69
Silindir Hacmi (cm ³)	1124
Silindir Sayısı	4
Sıkıştırma Oranı	10.2:1
Yakıt Sistemi	Magneti Marelli Çok nokta enjeksiyonlu

Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik şekli Şekil 6.1’de görülmektedir. Deney düzeneğine ait resimler de aşağıda mevcuttur.

Çalışmalar, silindir içerisine gönderilecek hidrojen-oksijen gaz karışımının sabit 20 A akımda elde edilip silindir içerisine gönderilmesiyle gerçekleştirilmiştir. 20 A değerindeki sabit akımın elde edilmesi güç kaynağı ile elektrolizör arasına bir PWM (Pulse Width Modulation) ünitesi yerleştirilerek sağlanmıştır. PWM elektronik bir kontrol metodu olup güç kaynağından gelen akımı, üzerindeki transistörler yardımıyla gerilimi değiştirerek manuel olarak ayarlanan değere sabitlemeye olanak sağlar. Gerilimi ayarlama olayına “kullanım oranı ayarı” (duty cycle adjustment) denir. Deneylerde kullanılan PWM ünitesi, kullanım oranının yanısıra frekans ayarlamaya da olanak sağlamakta olup resmi Şekil 6.4’te görülmektedir. Tüm deneyler, gaz keleşinin neredeyse tam kapalı konumda olduğu rölanti ve %25 ile %50 açıklıktaki kısmi yük şartlarında yapılmıştır. Elektroliz için gereken enerji PWM ünitesi yardımıyla, dışarıdan bir güç kaynağı kullanılarak veya motorun alternatöründen güç çekilerek yapılmış; elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneylerde silindirlere gönderilen hidrojen miktarını kontrol etmek için akışölçer kullanılmıştır. Hidrojen akışının düzenli olmasını sağlamak amacıyla buffer tanklar kullanılmıştır.

Deneyler esnasında motorun normal çalışma aralığında, silindir içerisine gönderilen hidrojen-oksijen karışımı kaynaklı herhangi bir vuruñtu ya da anormal yanma problemleri ile karşılaşılmamıştır. Benzinle ve silindir içerisine ek olarak gönderilen hidrojenle yapılan çalışmalardan elde edilen deney sonuçları grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



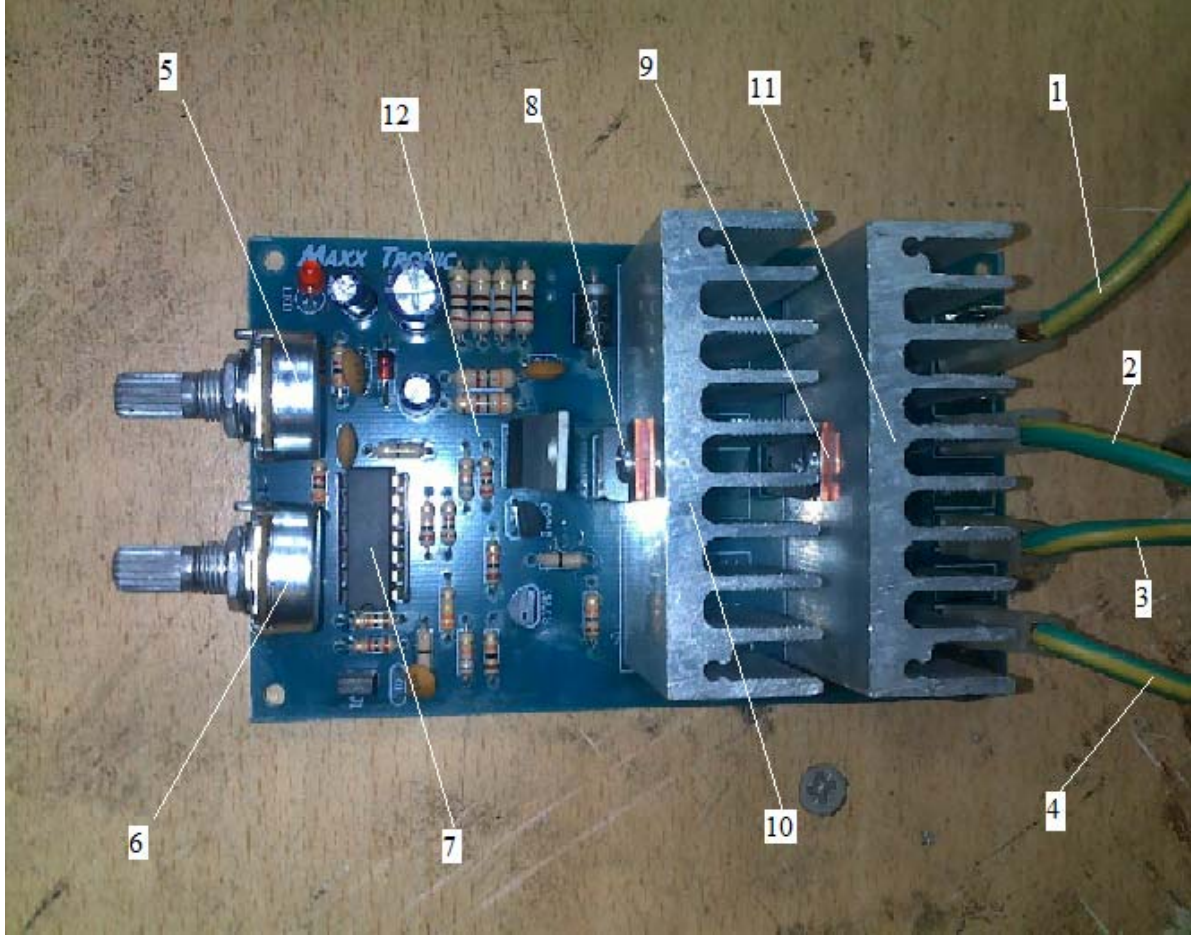
Şekil 6.1 Deney düzeneğinin şematik diyagramı



Şekil 6.2 Deney düzeneğinin bir görüntüsü



Şekil 6.3 Deney düzeneğinin bir görüntüsü



- | | |
|---|----------------------|
| 1- Güç Kaynağı ya da Alternatör "+" Ucu | 7- Mikroişlemci |
| 2- Elektrolizör "+" Ucu | 8, 9- Transistörler |
| 3- Elektrolizör "-" Ucu | 10, 11- Isı Emiciler |
| 4- Güç Kaynağı ya da Alternatör "-" Ucu | 12- Diğer Elemanlar |
| 5- Kullanım Oranı Ayarı | |
| 6- Frekans Ayarı | |

Şekil 6.4 PWM ünitesi ve elemanları

6.3 DeneY Sonuçları

Yapılan deneylere göre elde edilen sonuçlar ve grafikler ilgili başlıklar altında aşağıda sıralanmıştır:

6.3.1 Güç Kaynağı ile Rölanti Devrinde Yapılan Deneylerin Sonuçları

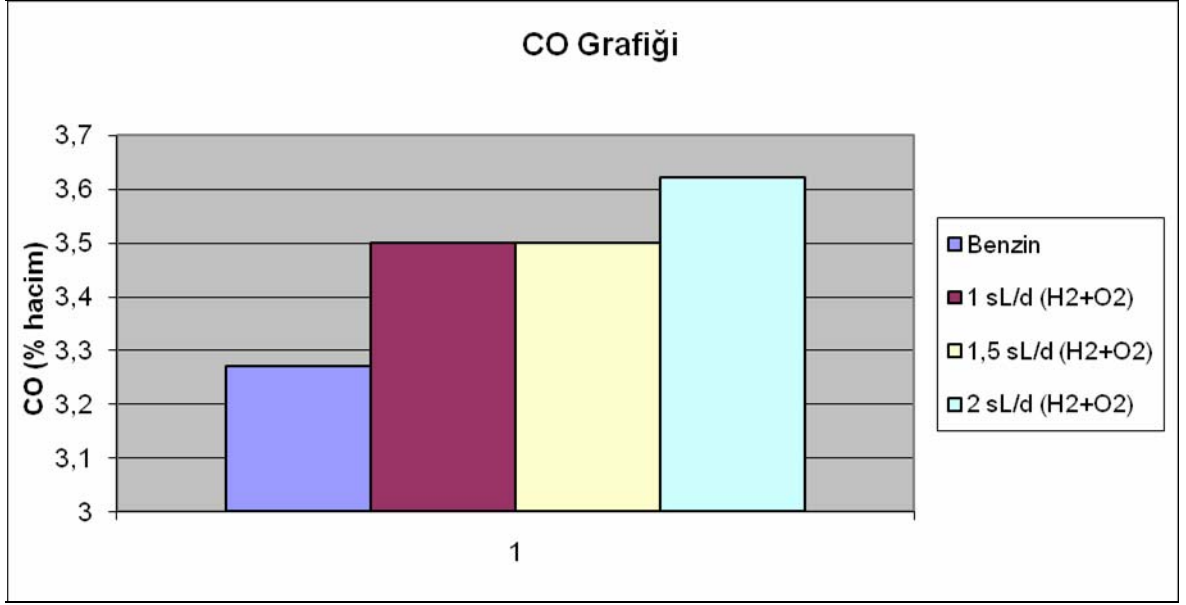
Güç kaynağı kullanılarak rölanti devrinde yapılan deneylerin sonuçları ve ait grafikler aşağıda görülmektedir. Şekil 6.8 motor gücünün deneylere göre değişimini göstermektedir. Benzinle yapılan çalışmada elde edilen maksimum motor gücü ortalama 0,139 kW (ortalama 880 d/d) olarak, hidrojenin ek yakıt olarak kullanımı ile yapılan çalışmalarda ise 20 A H₂ üretim şartında motor gücü ortalama 0,151 kW (ortalama 895,67 d/d) olarak ölçülmüştür.

Şekil 6.12 motor momentinin deneylere göre değişimini göstermektedir. Benzinle yapılan çalışmada maksimum motor momenti ortalama 1,51 Nm (ortalama 880 d/d) olarak ölçülmüş, hidrojenin ek yakıt olarak kullanımı ile yapılan çalışmada ise 20 A H₂ üretim şartında maksimum motor momenti ortalama 1,611 Nm (ortalama 895,67 d/d) olarak ölçülmüştür.

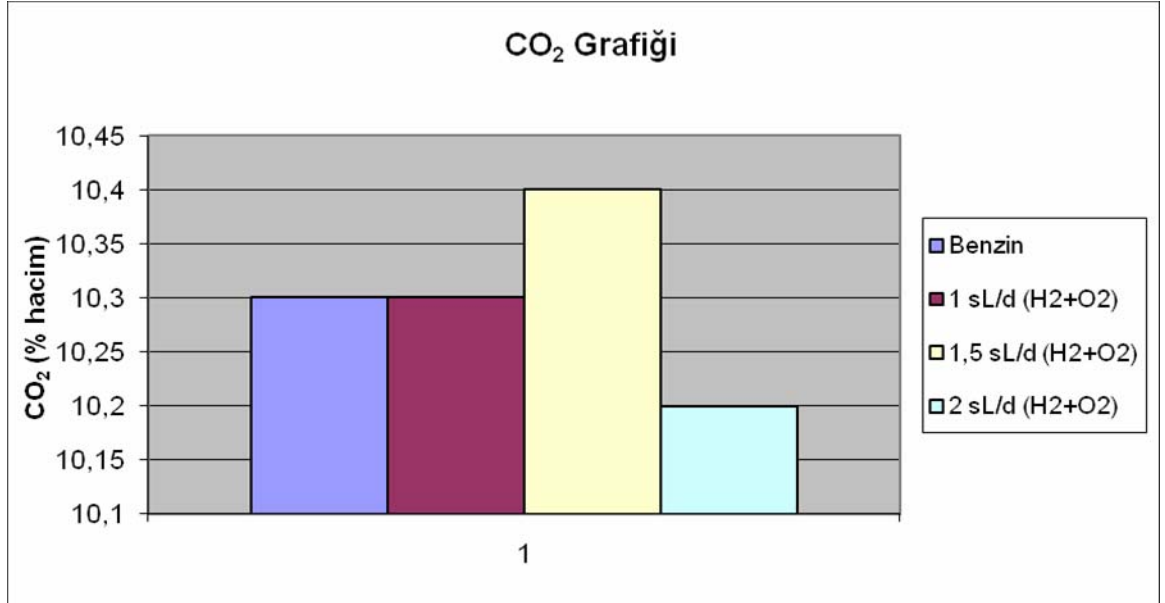
Aşağıdaki grafiklerde sadece benzin kullanımı ve farklı kademelerde güç kaynağı ile hidrojen üretiminde rölanti devri için performans ve emisyonlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.2 Güç kaynağı ile rölanti devrinde deney sonuçları

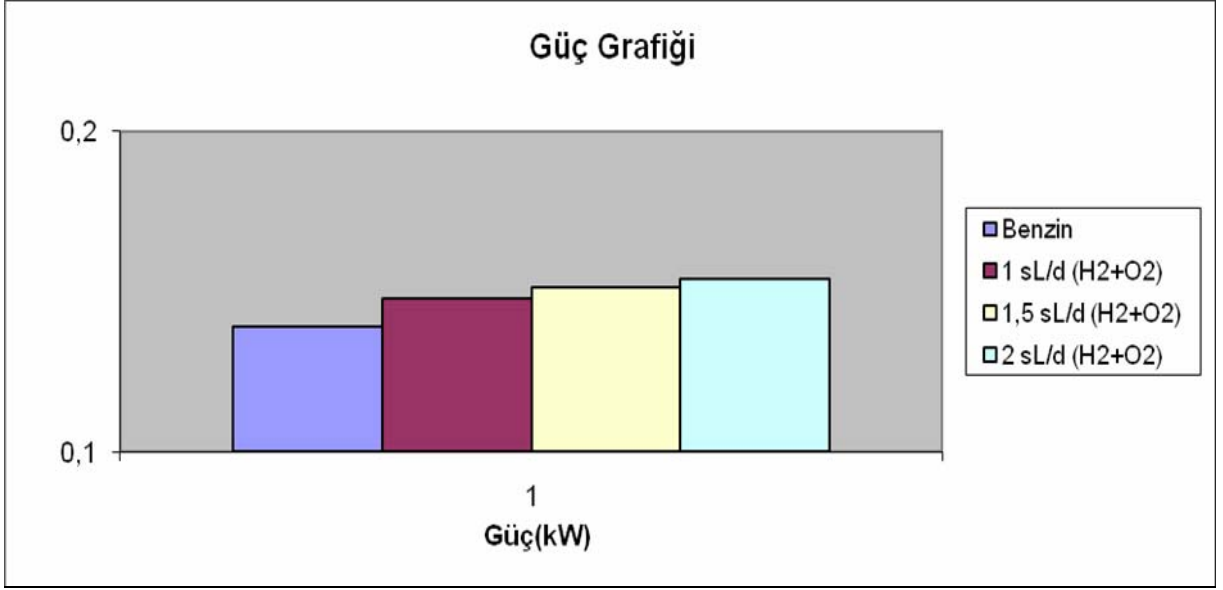
H₂+O₂ (sL/dk)	0	1	1,5	2
H₂ (sL/dk)	0,00	0,67	1,00	1,33
n (d/d)	880	890	894	903
F (kg)	0,542	0,57	0,58	0,585
t (s)	40	41	39	39
Moment Kolu (m)	0,284	0,284	0,284	0,284
M_d (Nm)	1,510	1,588	1,616	1,630
Güç (kW)	0,139	0,148	0,151	0,154
Bh (kg/h) (Benzin)	0,4500	0,4390244	0,461538462	0,461538462
be (g/kWh) (Benzin)	3233,8	2966,3	3050,9	2994,7
Verim (%) (Benzin)	0,025	0,027	0,027	0,027
Bh (kg/h) (Hidrojen)	0,00000	0,00328	0,00492	0,00656
Güç (kW) (Elektrolizör)	0,000	0,321	0,481	0,642
be (g/kWh) (Hidrojen)	0,000	22,161	32,523	42,565
Verim (%) (Hidrojen)	0,00	1,35	0,92	0,70
Toplam Özgül Yakıt Harcamı (g/kWh)	3233,85	2988,44	3083,44	3037,26
Toplam Verim	0,025	0,027	0,026	0,026
λ (Lambda)	1,081	1,04	1,032	1,046
CO (%hacim)	3,27	3,5	3,67	3,62
CO₂ (%hacim)	10,3	10,5	10,4	10,2
HC (ppm)	413	453	447	410
NO_x (ppm)	66	62	65	63



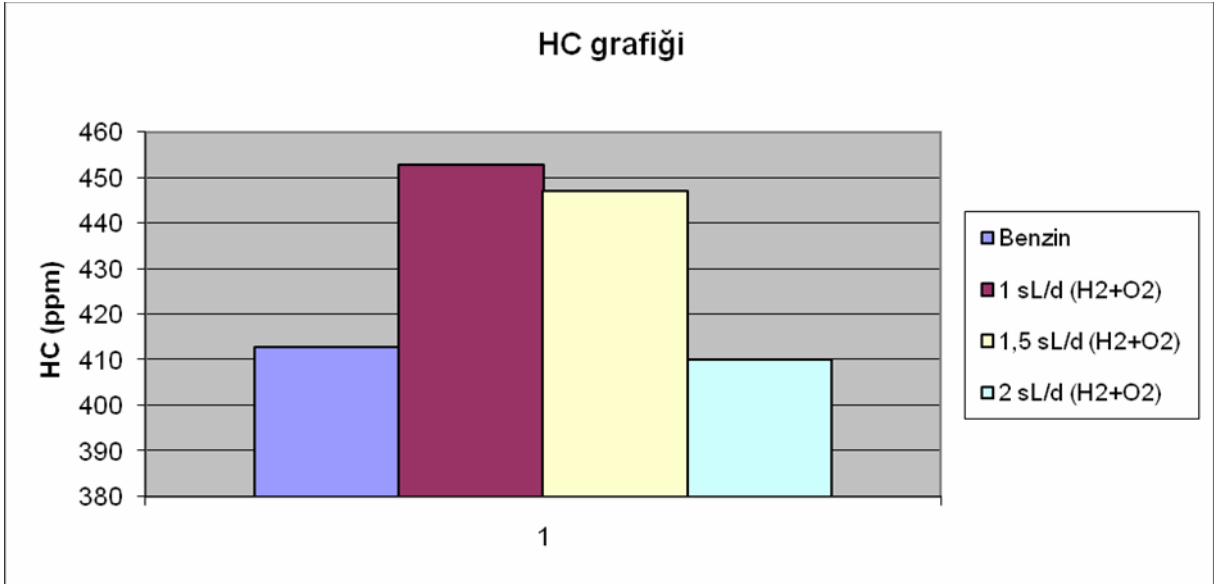
Şekil 6.5 Güç kaynağı kullanılarak rölantide karbon monoksit grafiği



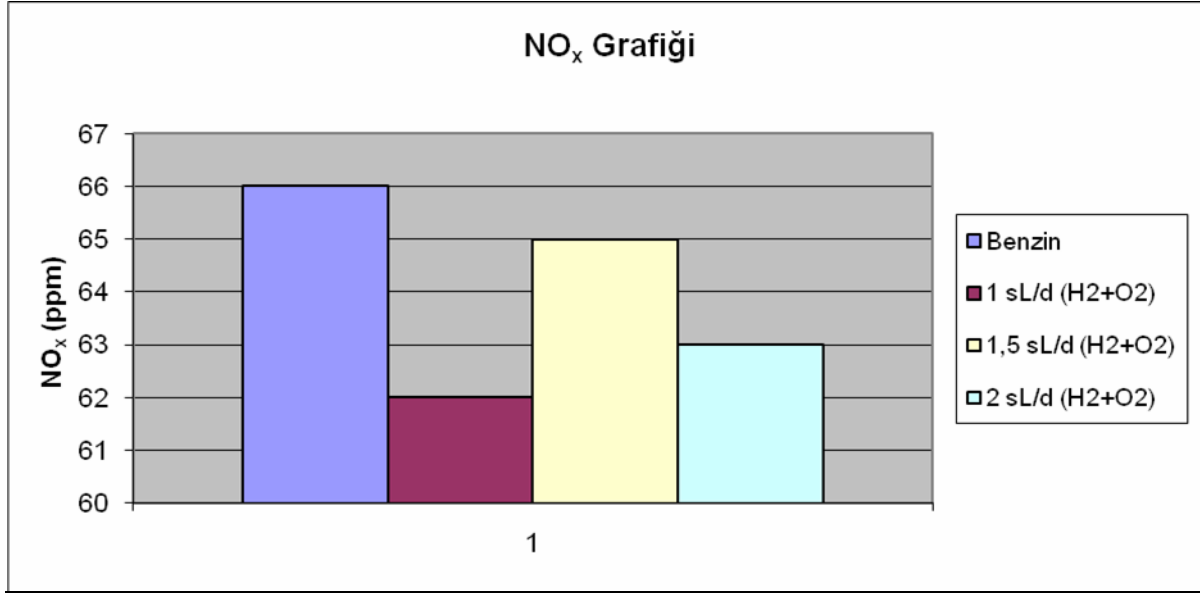
Şekil 6.6 Güç kaynağı kullanılarak rölantide karbon dioksit grafiği



Şekil 6.7 Güç kaynağı kullanılarak rölantide güç grafiği



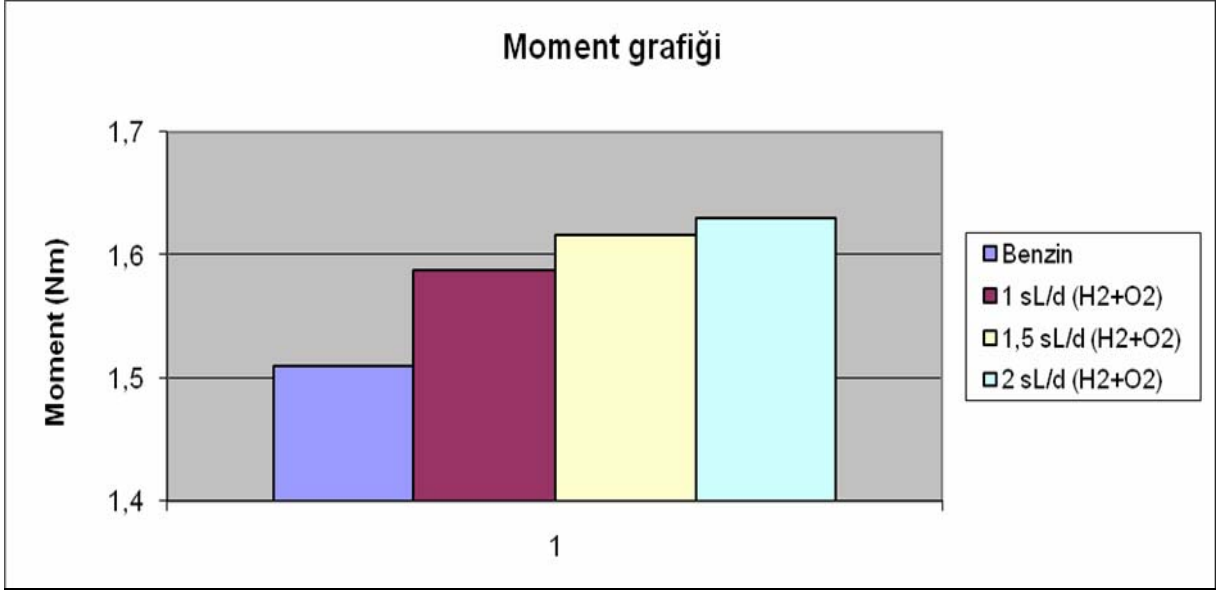
Şekil 6.8 Güç kaynağı kullanılarak rölantide hidrokarbon grafiği



Şekil 6.9 Güç kaynağı kullanılarak rölantide azot oksit grafiği



Şekil 6.10 Güç kaynağı kullanılarak rölantide özgöl yakıt tüketimi grafiği



Şekil 6.11 Güç kaynağı kullanılarak rölantide moment grafiği

6.3.2 Alternatör ile Rölanti, %25 ve %50 Kısmi Yükte Yapılan Deneylerin Sonuçları

Alternatör kullanılarak rölanti, %25 ve %50 kısmi yükte yapılan deneylerin sonuçlarına ait grafikler aşağıda görülmektedir. Şekil 6.22, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24 motor gücünün deneylere göre değişimini göstermektedir. Benzinle yapılan çalışmada elde edilen maksimum motor gücü rölantide ortalama 0,132 kW (ortalama 1025 d/d), %25 yükte ortalama 1,081 kW (ortalama 1407,16 d/d) ve %50 yükte ortalama 2,263 kW (ortalama 1954,57 d/d) olarak bulunmuştur. Hidrojenin ek yakıt olarak kullanımı ile yapılan çalışmalarda ise 20 A H₂ üretim şartında maksimum motor gücü rölantide ortalama 0,180 kW (ortalama 1030 d/d), %25 yükte ortalama 1,108 kW (ortalama 1444,5 d/d) ve %50 yükte ortalama 2,339 kW (ortalama 1946,67 d/d) olarak ölçülmüştür.

Şekil 6.34, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36 motor momentinin deneylere göre değişimini göstermektedir. Benzinle yapılan çalışmada maksimum motor momentini rölantide ortalama 1,226 Nm (ortalama 1025 d/d), %25 yükte 7,438 Nm (ortalama 1407,16 d/d), %50 yükte 11,263 Nm (ortalama 1954,57 d/d) olarak ölçülmüş, hidrojenin ek yakıt olarak kullanımı ile yapılan çalışmada ise 20 A H₂ üretim şartında maksimum motor momentini rölantide ortalama 1,672 Nm (ortalama 1030 d/d), %25 yükte ortalama 7,336 Nm (ortalama 1444,5 d/d), %50 yükte ortalama 11,678 Nm (ortalama 1946,67 d/d) olarak ölçülmüştür.

Çizelge 6.3 Alternatör ile rölanti devrinde deney sonuçları

H₂+O₂(sL/d)	0	2
H₂ (sL/d)	0,00	1,33
n(d/d)	1025	1030
F(kg)	0,44	0,6
Kol (m)	0,284	0,284
Md (Nm)	1,226	1,672
Güç (kW)	0,132	0,180
Bh (kg/h) (benzin)	0,973	1,000
Verim (%) (benzin)	0,011	0,015
be (g/kWh) (benzin)	7394,6	5546,3
Bh (kg/h) (hidrojen)	0,00000	0,00656
be (g/kWh) (hidrojen)	0,000	36,383
Toplam Özgül Yakıt Harcamı (g/kWh)	7394,57	5582,64
Toplam Verim	0,011	0,014
λ (lambda)	1,17	1,16
CO (%hacim)	0,33	0,43
CO₂ (%hacim)	12,4	12,3
O₂ (%hacim)	3,43	3,3
HC (ppm)	125	123
NO_x (ppm)	164	183
Benzin Tüketimi (s/10 g)	37	36

Çizelge 6.4 Alternatör ile %25 kısmi yükte 1. deney sonuçları

H₂+O₂(sL/d)	0	2	0	2
H₂ (sL/d)	0,00	1,33	0,00	1,33
n(d/d)	1640	1678	1550	1490
F(kg)	2,23	2,44	3	2,85
Kol (m)	0,284	0,284	0,284	0,284
Md (Nm)	6,213	6,798	8,358	7,940
Güç (kW)	1,067	1,195	1,357	1,239
Bh (kg/h) (benzin)	1,286	1,333	1,161	1,091
Verim (%) (benzin)	0,067	0,073	0,095	0,092
be (g/kWh) (benzin)	1205,0	1116,2	856,0	880,5
Bh (kg/h) (hidrojen)	0,00000	0,00656	0,00000	0,00656
be (g/kWh) (hidrojen)	0,000	5,492	0,000	5,295
Toplam Özgül Yakıt Harcamı (g/kWh)	1204,99	1121,70	856,01	885,83
Toplam Verim	0,067	0,072	0,095	0,091
λ (lambda)	0,96	0,923	1,093	1,093
CO (%hacim)	0,32	0,41	0,37	0,5
CO₂ (%hacim)	12,1	11,6	13,2	12,9
O₂ (%hacim)	1,42	1,19	2,21	2,27
HC (ppm)	217	289	174	191
NO_x (ppm)	123	158	196	271
Benzin Tüketimi (s/10 g)	28	27	31	33

Çizelge 6.5 Alternatör ile %25 kısmi yükte 2. deney sonuçları

H₂+O₂(sL/d)	0	2	0	2
H₂ (sL/d)	0,00	1,33	0,00	1,33
n(d/d)	995	1030	978	1000
F(kg)	2	1,68	3,68	3,5
Kol (m)	0,284	0,284	0,284	0,284
Md (Nm)	5,572	4,681	10,253	9,751
Güç (kW)	0,581	0,505	1,050	1,021
Bh (kg/h) (benzin)	1,059	1,000	1,000	1,000
Verim (%) (benzin)	0,044	0,041	0,085	0,083
be (g/kWh) (benzin)	1823,7	1980,8	952,4	979,3
Bh (kg/h) (hidrojen)	0,00000	0,00656	0,00000	0,00656
be (g/kWh) (hidrojen)	0,000	12,994	0,000	6,424
Toplam Özgül Yakıt Harcamı (g/kWh)	1823,72	1993,80	952,36	985,74
Toplam Verim	0,044	0,040	0,085	0,081
λ (lambda)	1,163	1,133	1,151	1,133
CO (%hacim)	0,4	0,42	0,44	0,39
CO₂ (%hacim)	12,3	12,6	12,4	12,6
O₂ (%hacim)	3,28	2,83	3,18	2,88
HC (ppm)	87	110	132	169
NO_x (ppm)	177	221	206	292
Benzin Tüketimi (s/10 g)	34	36	36	36

Çizelge 6.6 Alternatör ile %25 kısmi yükte 3. deney sonuçları

H₂+O₂(sL/d)	0	2	0	2
H₂ (sL/d)	0,00	1,33	0,00	1,33
n(d/d)	1730	1779	1550	1690
F(kg)	2,31	2,33	2,8	3
Kol (m)	0,284	0,284	0,284	0,284
Md (Nm)	6,436	6,491	7,801	8,358
Güç (kW)	1,166	1,209	1,266	1,479
Bh (kg/h) (benzin)	1,241	1,059	1,161	1,091
Verim (%) (benzin)	0,076	0,093	0,088	0,110
be (g/kWh) (benzin)	1064,7	875,5	917,1	737,5
Bh (kg/h) (hidrojen)	0,00000	0,00656	0,00000	0,00656
be (g/kWh) (hidrojen)	0,000	5,425	0,000	4,435
Toplam Özgül Yakıt Harcamı (g/kWh)	1064,72	880,97	917,15	741,95
Toplam Verim	0,076	0,091	0,088	0,108
λ (lambda)	1,083	1,102	1,093	1,094
CO (%hacim)	0,91	0,71	0,51	0,5
CO₂ (%hacim)	12,5	13	12,9	13
O₂ (%hacim)	2,47	2,68	2,34	2,35
HC (ppm)	329	253	264	234
NO_x (ppm)	353	253	264	234
Benzin Tüketimi (s/10 g)	29	34	31	33

Çizelge 6.7 Alternatör ile %50 kısmi yükte 1. deney sonuçları

H₂+O₂(sL/d)	0	2
H₂ (sL/d)	0,00	1,33
n(d/d)	1930	1890
F(kg)	3	2,67
Kol (m)	0,284	0,284
Md (Nm)	8,358	7,439
Güç (kW)	1,689	1,472
Bh (kg/h) (benzin)	1,440	1,333
Verim (%) (benzin)	0,095	0,090
be (g/kWh) (benzin)	852,5	905,6
Bh (kg/h) (hidrojen)	0,00000	0,00656
be (g/kWh)	0,000	4,456
Toplam Özgül Yakıt Harcamı (g/kWh)	852,46	910,09
Toplam Verim	0,095	0,088
λ (lambda)	1,058	1,063
CO (%hacim)	0,42	0,64
CO₂ (%hacim)	13,6	13,3
O₂ (%hacim)	1,58	1,81
HC (ppm)	161	168
NO_x (ppm)	236	319
Benzin Tüketimi (s/10 g)	25	27

Çizelge 6.8 Alternatör ile %50 kısmi yükte 2. deney sonuçları

H₂+O₂(sL/d)	0	2	0	2	0	2
H₂ (sL/d)	0,00	1,33	0,00	1,33	0,00	1,33
n(d/d)	2250	2140	2100	2100	1180	1140
F(kg)	3,9	3,6	5	4,77	5,55	5,35
Kol (m)	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284
Md (Nm)	10,866	10,030	13,930	13,289	15,463	14,905
Güç (kW)	2,560	2,248	3,063	2,922	1,911	1,779
Bh (kg/h) (benzin)	1,714	1,636	1,636	1,895	2,000	1,714
Verim (%) (benzin)	0,121	0,111	0,152	0,125	0,077	0,084
be (g/kWh) (benzin)	669,6	728,0	534,2	648,3	1046,8	963,4
Bh (kg/h) (hidrojen)	0,00000	0,00656	0,00000	0,00656	0,00000	0,00656
be (g/kWh) (hidrojen)	0,000	2,919	0,000	2,245	0,000	3,687
Toplam Özgül Yakıt Harcamı (g/kWh)	669,61	730,95	534,17	650,58	1046,75	967,10
Toplam Verim	0,121	0,110	0,152	0,124	0,077	0,083
λ (lambda)	1,056	1,053	1,045	0,95	0,89	0,87
CO (%hacim)	0,41	0,62	0,48	2,51	5,5	5,95
CO₂ (%hacim)	13,6	13,5	13,7	12,4	10,6	10,4
O₂ (%hacim)	1,55	1,59	1,34	0,78	1,28	1,16
HC (ppm)	191	139	135	214	157	178
NO_x (ppm)	296	334	364	165	141	142
Benzin Tüketimi (s/10 g)	21	22	22	19	18	21

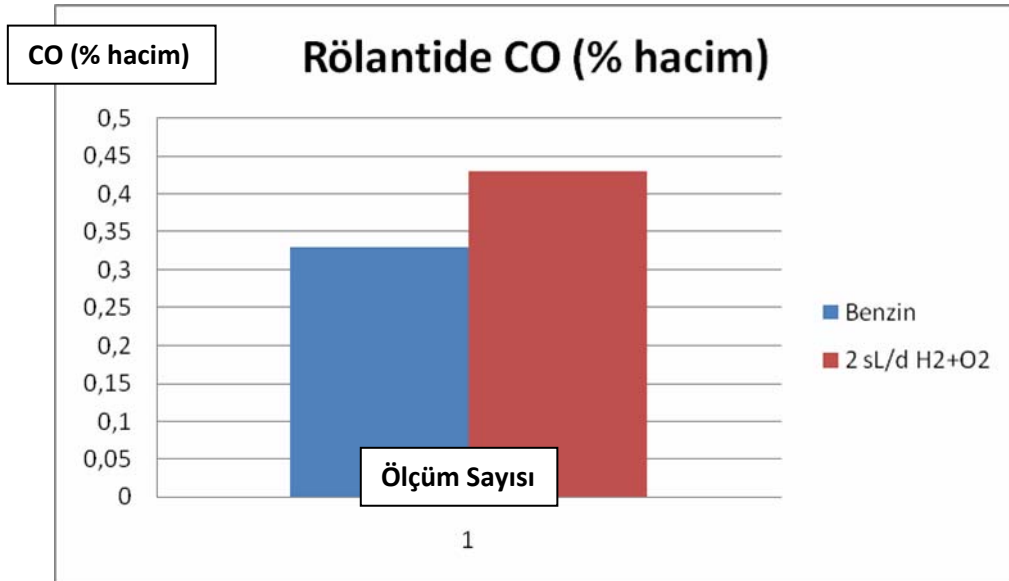
Çizelge 6.9 Alternatör ile %50 kısmi yükte 3. deney sonuçları

H₂+O₂(sL/d)	0	0	2	0	2
H₂ (sL/d)	0,00	0,00	1,33	0,00	1,33
n(d/d)	1885	2228	2295	2109	2115
F(kg)	2,65	3,4	3,98	4,8	4,78
Kol (m)	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284
Md (Nm)	7,383	9,473	11,088	13,373	13,317
Güç (kW)	1,457	2,210	2,665	2,953	2,950
Bh (kg/h) (benzin)	1,440	1,895	1,636	1,714	1,500
Verim (%) (benzin)	0,082	0,095	0,132	0,140	0,159
be (g/kWh) (benzin)	988,1	857,3	614,0	580,4	508,6
Bh (kg/h) (hidrojen)	0,00000	0,00000	0,00656	0,00000	0,00656
be (g/kWh) (hidrojen)	0,000	0,000	2,462	0,000	2,224
Toplam Özgül Yakıt Harcamı (g/kWh)	988,08	857,32	616,51	580,44	510,78
Toplam Verim	0,082	0,095	0,131	0,140	0,158
λ (lambda)	1,06	1,066	1,053	1,052	1,048
CO (%hacim)	0,73	0,58	0,62	0,54	0,6
CO₂ (%hacim)	13,4	13,2	13,4	13,6	13,6
O₂ (%hacim)	1,81	1,87	1,64	1,56	1,53
HC (ppm)	145	220	209	186	184
NO_x (ppm)	289	576	623	584	652
Benzin Tüketimi (s/10 g)	25	19	22	21	24

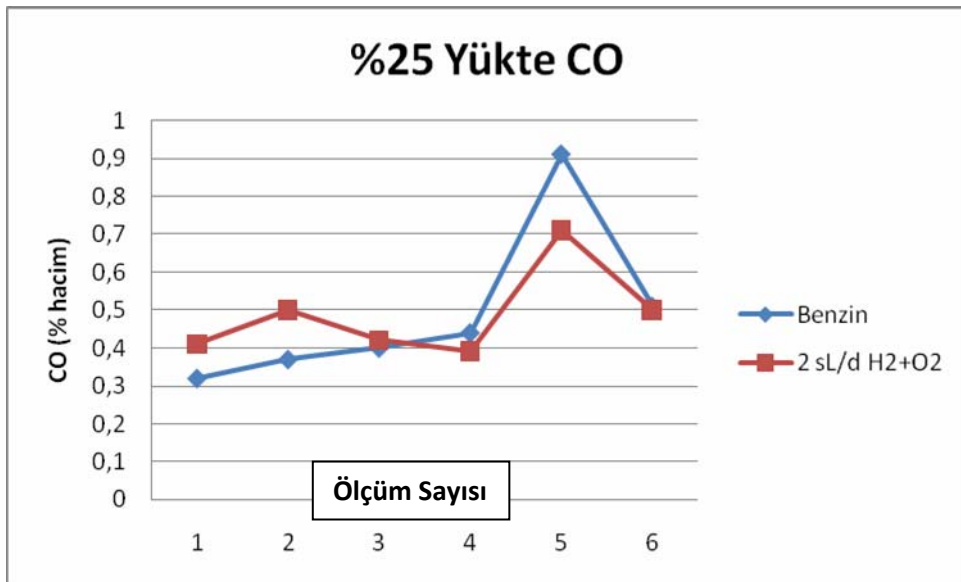
Yüksek motor devirlerinde, silindir içerisine sevk edilen hidrojen miktarı arttıkça elde edilen gücün benzinle yapılan çalışmada elde edilen güç değerine yaklaştığı görülmektedir. Frenleme etkisinin yüksek olduğu düşük motor devirlerinde ise, hidrojen gönderilmesiyle elde edilen güç değerlerinde benzine göre artış olduğu görülmektedir.

Deney sonuçlarından görüldüğü şekilde, hidrojenin silindire ek yakıt olarak gönderilmesiyle özellikle düşük motor devir sayılarında maksimum momentlerde benzine göre bir artış olduğu görülmektedir.

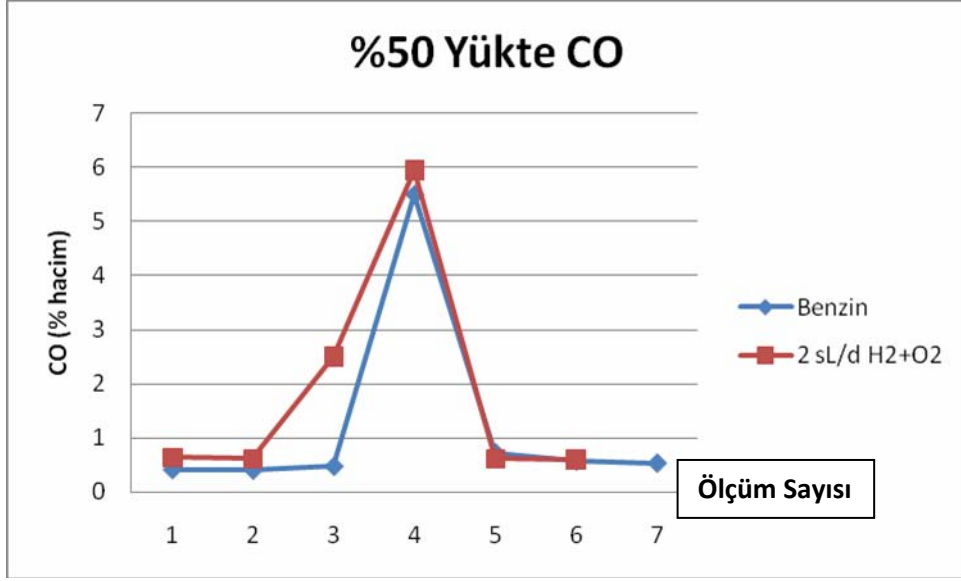
Aşağıdaki grafiklerde rölanti ve kısmi yük kademeleri için sadece benzin ile çalışma ve alternatör ile 2 l/dk hidrojen üretiminde çalışma durumlarında performans ve emisyonlar karşılaştırılmıştır. Grafiklerde x eksenini yapılan ölçüm sayısını göstermektedir.



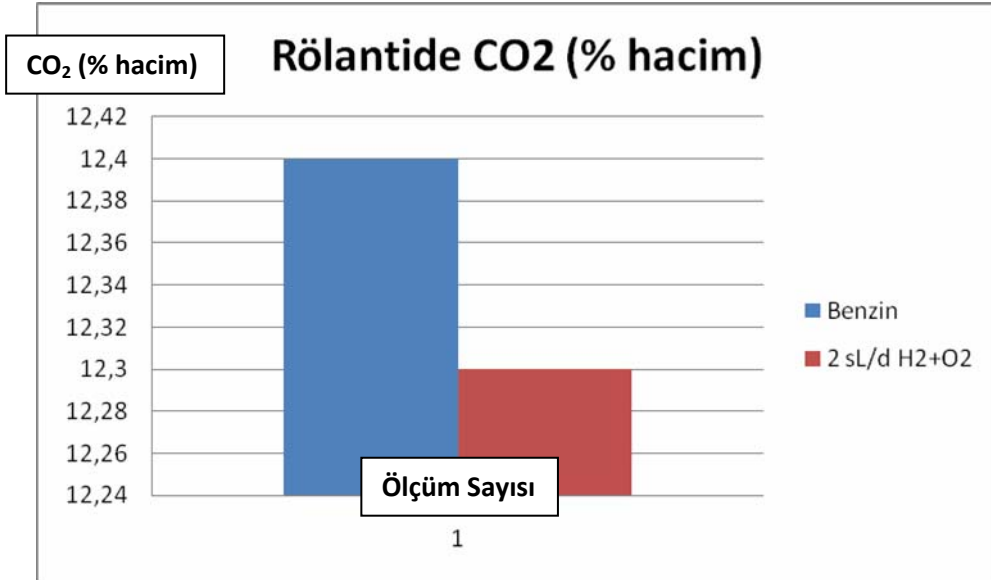
Şekil 6.12 Alternatör kullanılarak rölantide karbon monoksit grafiği



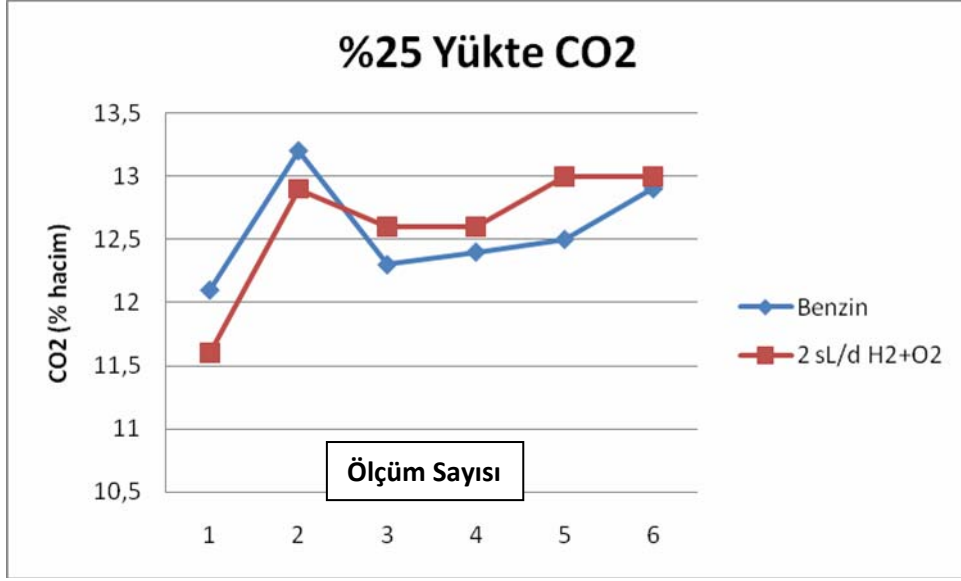
Şekil 6.13 Alternatör kullanılarak %25 yükte karbon monoksit grafiği



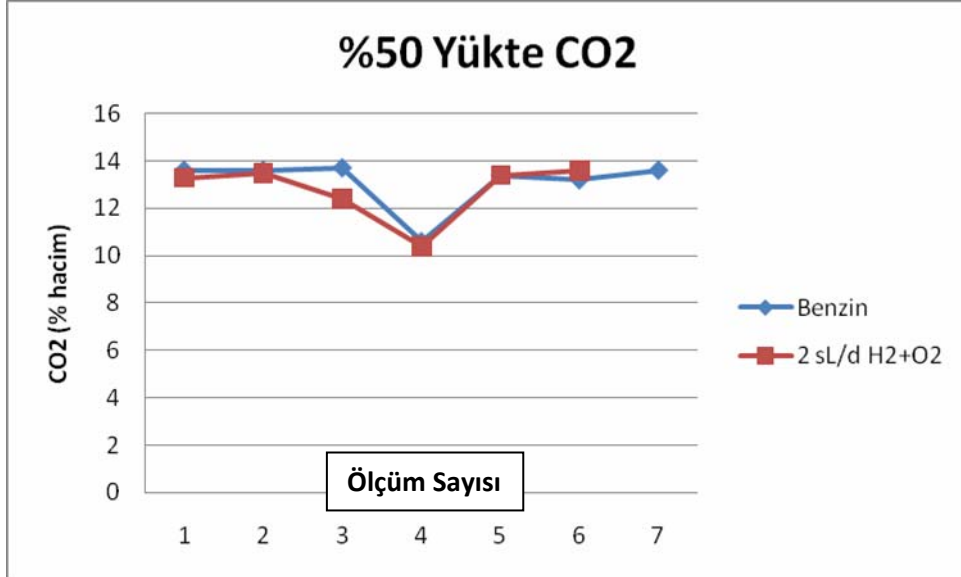
Şekil 6.14 Alternatör kullanılarak %50 yükte karbon monoksit grafiği



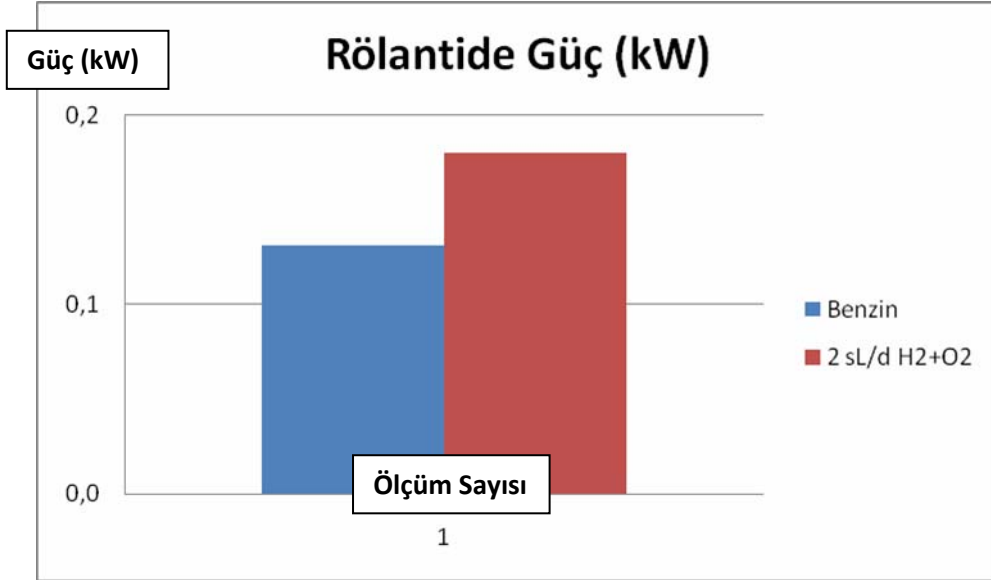
Şekil 6.15 Alternatör kullanılarak rölantide karbon dioksit grafiği



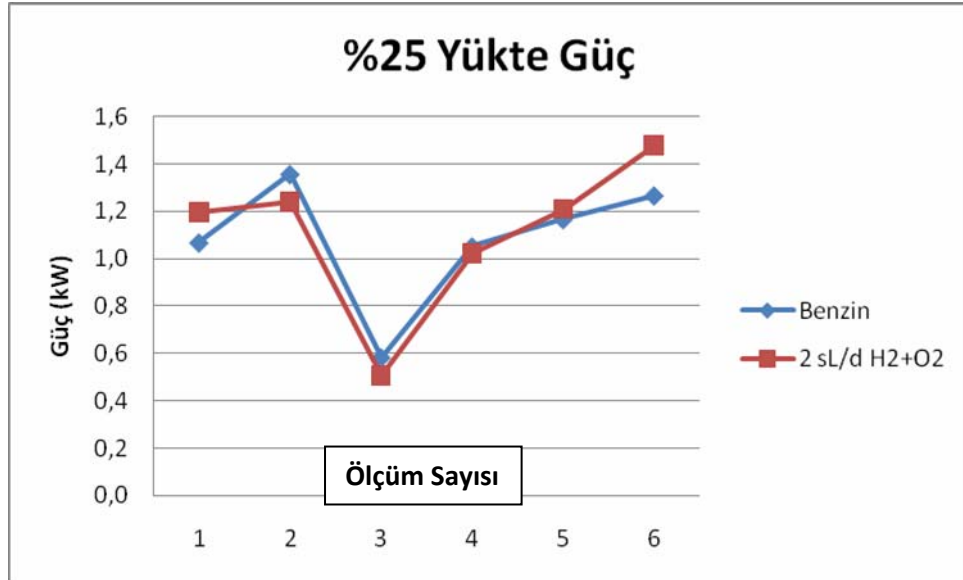
Şekil 6.16 Alternatör kullanılarak %25 yükte karbon dioksit grafiği



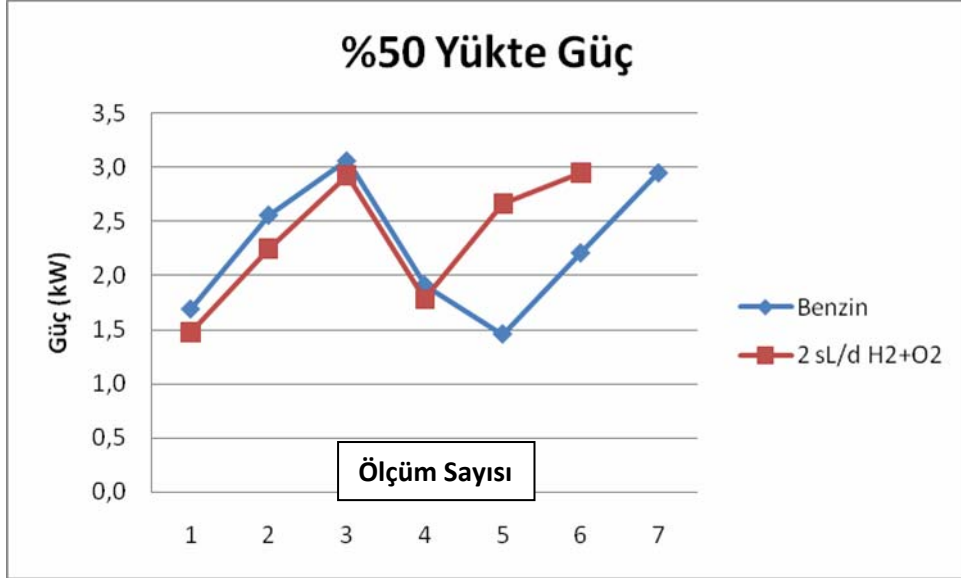
Şekil 6.17 Alternatör kullanılarak %50 yükte karbon dioksit grafiği



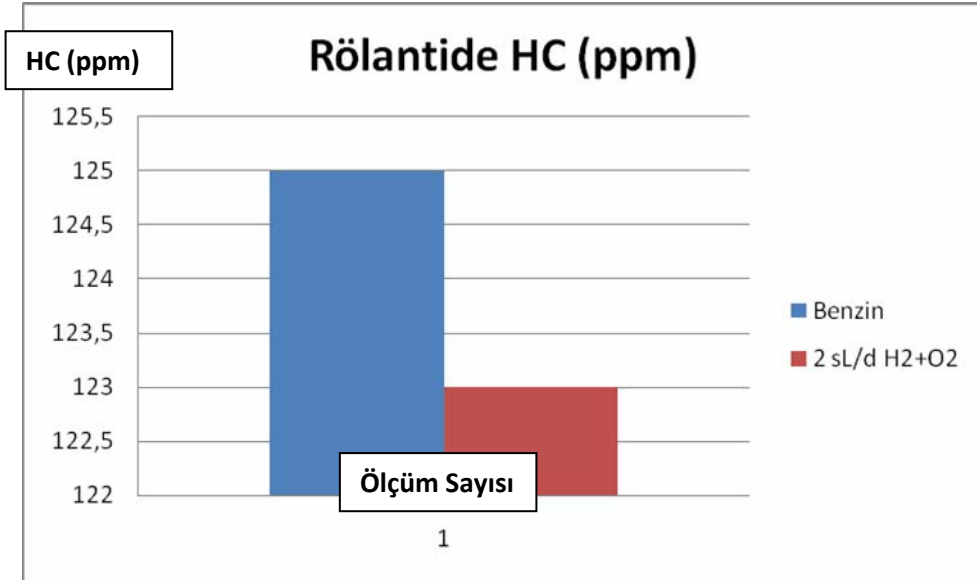
Şekil 6.18 Alternatör kullanılarak rölantide güç grafiği



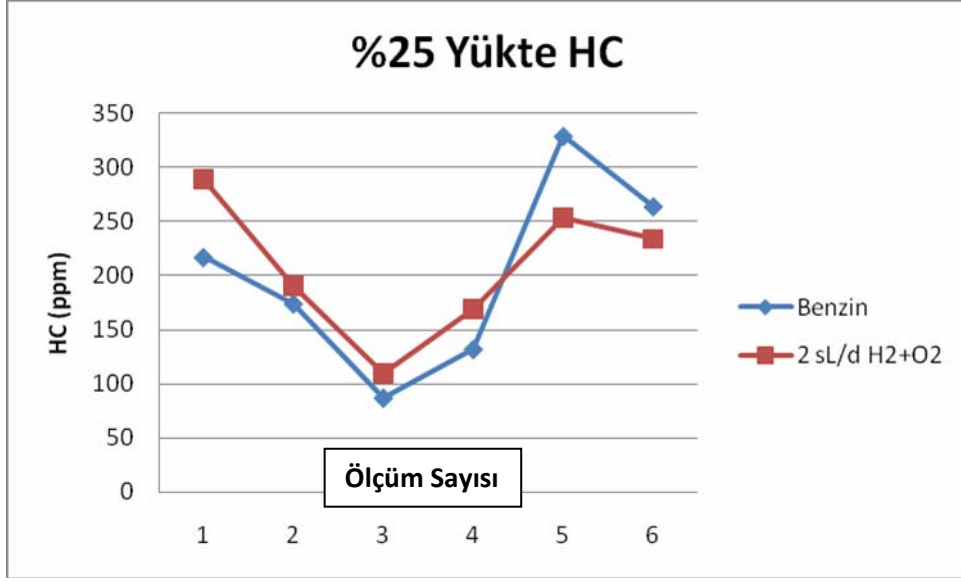
Şekil 6.19 Alternatör kullanılarak %25 yükte güç grafiği



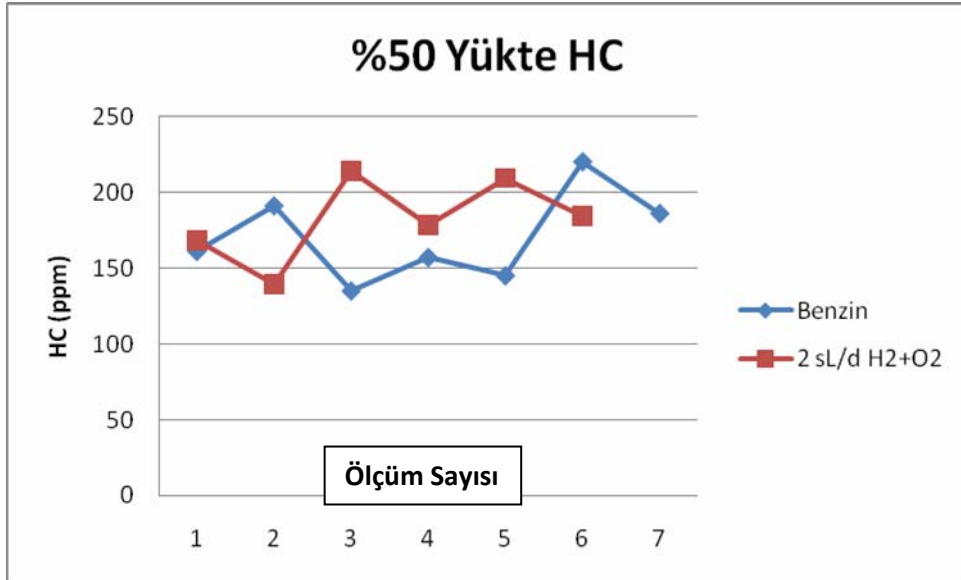
Şekil 6.20 Alternatör kullanılarak %50 yükte güç grafiği



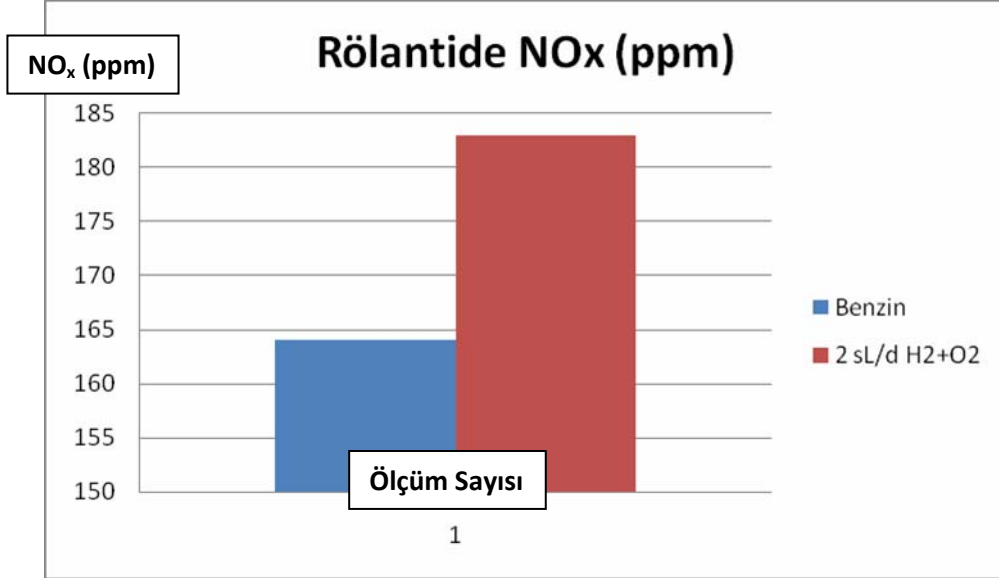
Şekil 6.21 Alternatör kullanılarak rölantide hidrokarbon grafiği



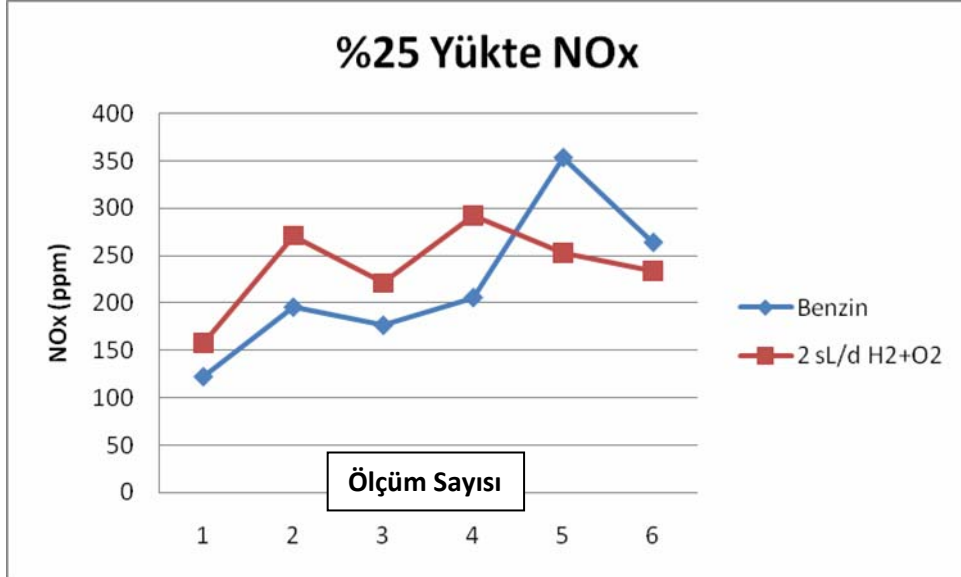
Şekil 6.22 Alternatör kullanılarak %25 yükte hidrokarbon grafiği



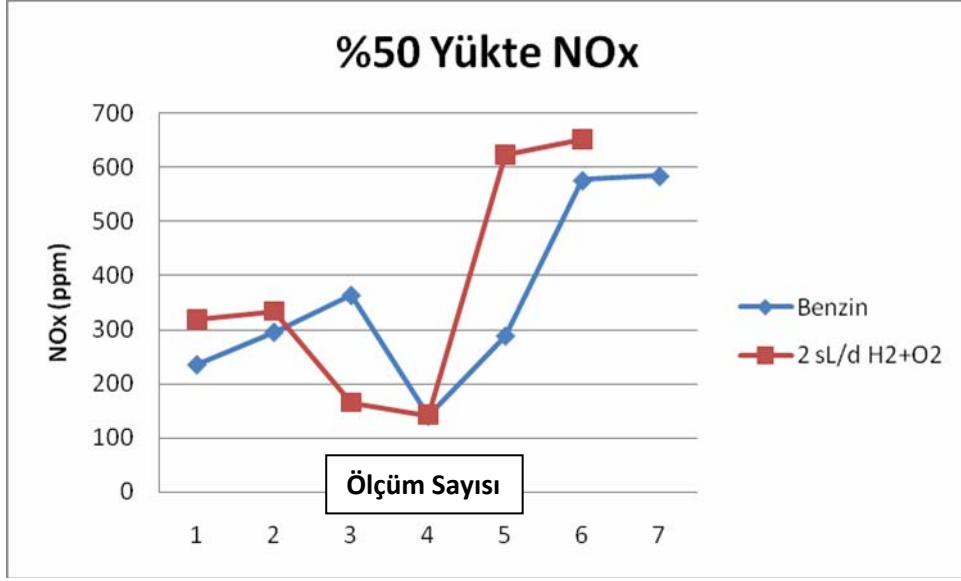
Şekil 6.23 Alternatör kullanılarak %50 yükte hidrokarbon grafiği



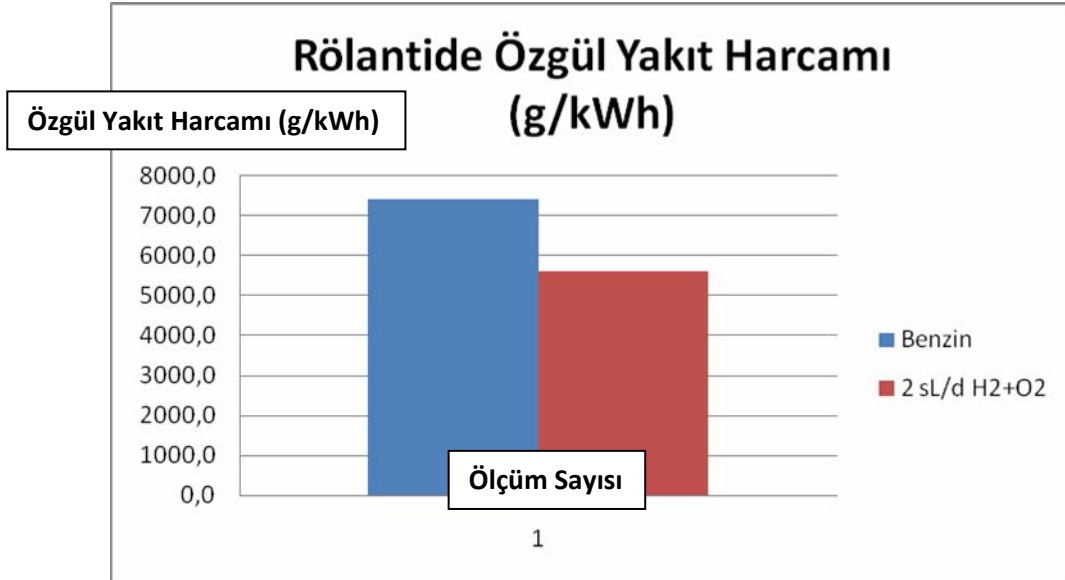
Şekil 6.24 Alternatör kullanılarak rölantide azot oksit grafiği



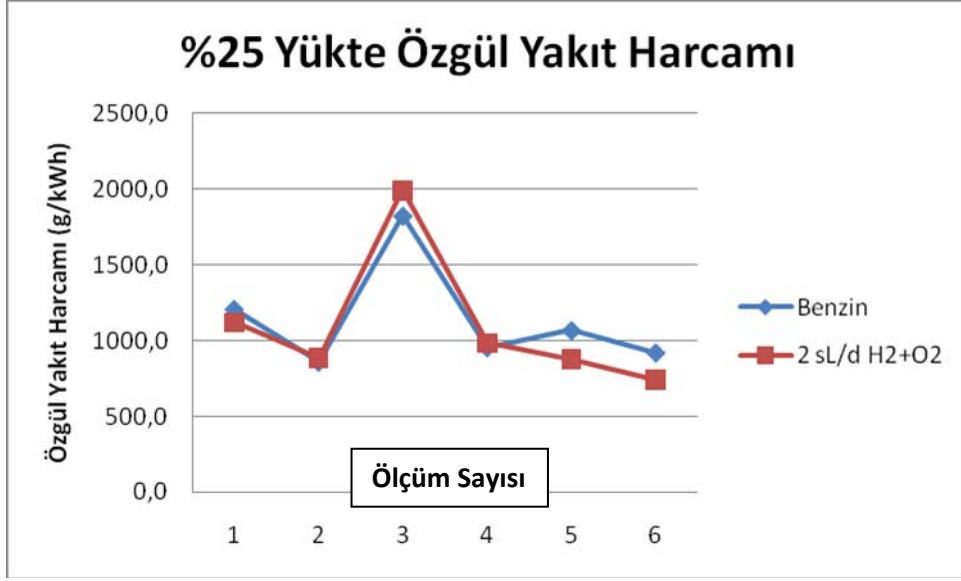
Şekil 6.25 Alternatör kullanılarak %25 yükte azot oksit grafiği



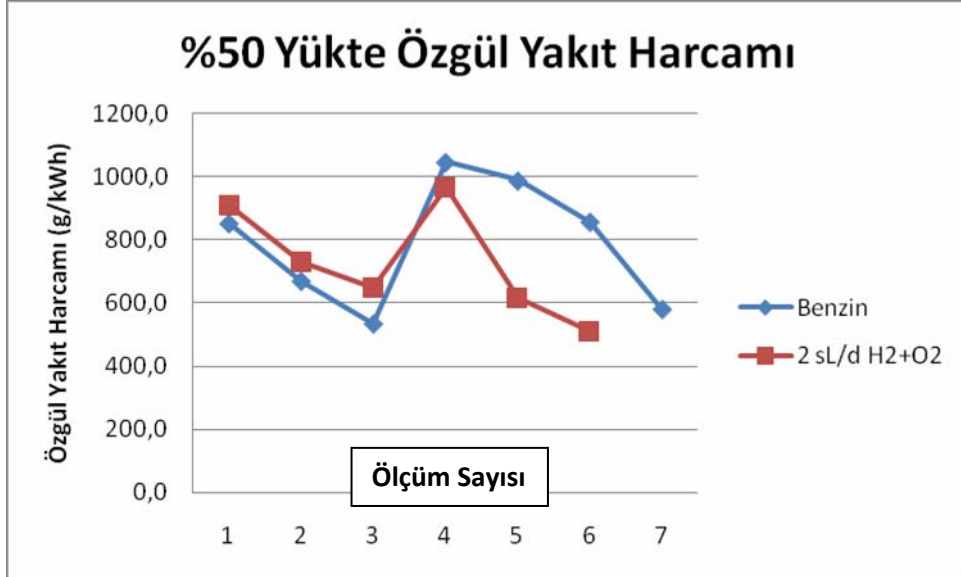
Şekil 6.26 Alternatör kullanılarak %50 yükte azot oksit grafiği



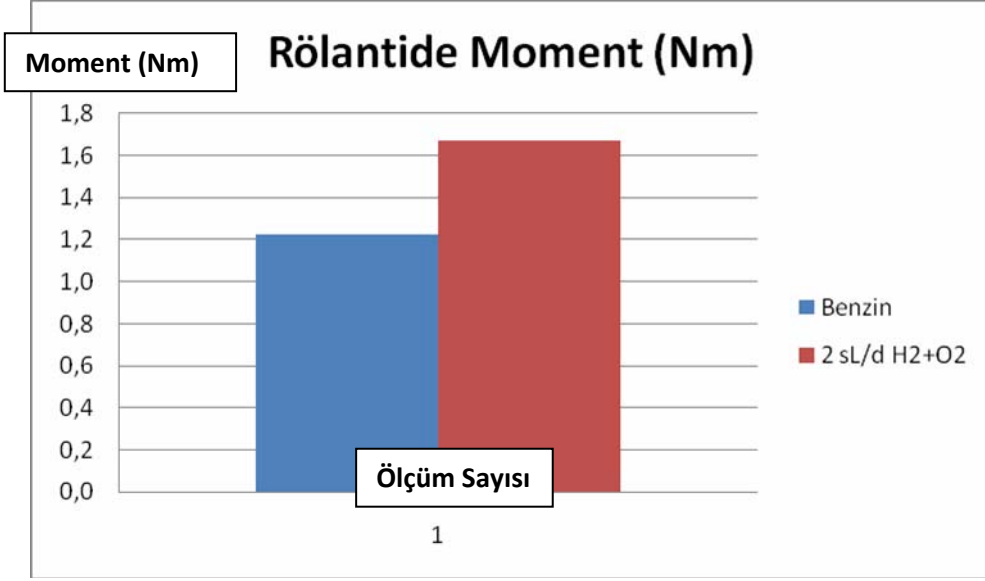
Şekil 6.27 Alternatör kullanılarak rölantide özgül yakıt tüketimi grafiği



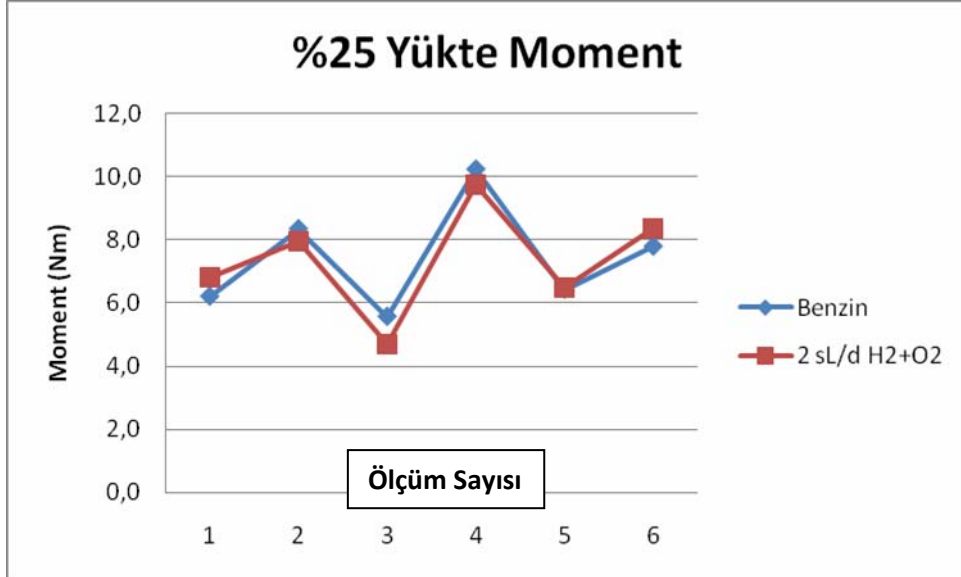
Şekil 6.28 Alternatör kullanılarak %25 yükte özgöl yakıt tüketimi grafiği



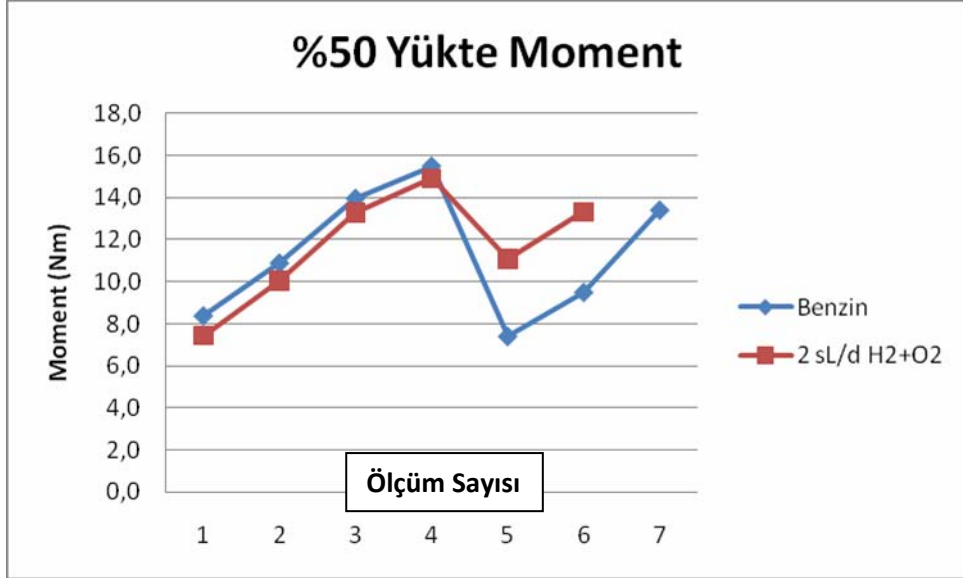
Şekil 6.29 Alternatör kullanılarak %50 yükte özgöl yakıt tüketimi grafiği



Şekil 6.30 Alternatör kullanılarak rölantide moment grafiği



Şekil 6.31 Alternatör kullanılarak %25 yükte moment grafiği



Şekil 6.32 Alternatör kullanılarak %50 yükte moment grafiği

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmayla, piyasada ticari olarak mevcut bir elektrolizör kullanılarak veya taşıt motorunun alternatöründen yararlanarak, elde edilen hidrojenin depolanmasına gerek kalmadan Otto çevrimine göre çalışan bir motorda ek yakıt olarak kullanılmasıyla, özellikle yüksek güç talebinin olmadığı şehir içi sürüş şartlarında yakıt tüketimi ve ortama atılan emisyonlar açısından faydalı olacağı görülmüştür. Deneylelerden elde edilen bulgulara göre sonuç olarak;

1. Ek yakıt olarak silindir içine gönderilen hidrojen miktarının yetersiz kalması ve hidrojenin hacimsel enerji yoğunluğunun düşük olması nedeniyle, yüksek motor devirlerinde motor performansında yeterince etkili olmadığı, düşük motor devirlerinde ise motor gücünü artırıcı yönde etkisi olduğu görülmüştür.
2. Deney sonuçlarına göre, hidrojenin silindire ek yakıt olarak gönderilmesiyle özellikle düşük motor devir sayılarında maksimum momentlerde benzine göre bir artış olduğu görülmüştür.
3. Hidrojenle çalışmanın özellikle düşük devirlerde CO₂ ve yanmamış hidrokarbon salınımını azalttığı görülmektedir. Buna karşılık aynı şartlarda meydana gelen CO salınımında bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir. CO salınımındaki artışın hidrojen eklenmesiyle hava-yakıt oranının azalması karışımın zenginleşmesinden kaynaklandığı göze çarpmaktadır.
4. Düşük motor devirlerinde hidrojenin ek yakıt olarak kullanılmasının özgül yakıt sarfiyatına etkisinin olumlu yönde olduğu görülmektedir, fakat bu özellikle motor devri arttıkça belirginliğini yitirmektedir. Bu nedenle özellikle düşük motor devirlerinde silindir içine yüksek miktarlarda hidrojen gazının gönderilmesi fosil yakıt tüketimini büyük oranlarda azaltacağı görülmektedir.

5. Hidrojeni ek yakıt olarak kullanırken hidrojenin yanma reaksiyonunda açığa çıkan yüksek ısı ve hidrojen-oksijen karışımından gelen fazla oksijenden ötürü özellikle rölanti gibi düşük motor devirlerinde NO_x salınımının arttığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, ek yakıt kullanımıyla özellikle düşük devirlerde motor performansında artış görüldüğü, ortama atılacak emisyon miktarlarının da artan performans ve azalan yakıt sarfiyatıyla birlikte azalacağı, kullanılan alkali elektrolizörün hibrit taşıt teknolojisine göre ilk yatırım ve işletme maliyetinin çok düşük olması ve belirtilen faydaları da göz önünde bulundurulduğunda, hibrit taşıt teknolojisine alternatif olacağı öngörülmektedir.

Uygulama sırasında elektrolizörün kullandığı enerji oldukça fazla olduğundan ötürü harcanan toplam enerjiyi azaltmak ve sistemin genel verimini arttırmak amacıyla sistem üzerinde çeşitli modifikasyonlara ve iyileştirmelere gidilmesi uygulanabilirliği arttıracaktır. Bu amaçla fren sistemine ek olarak rejeneratif fren sistemi kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Gül, K.E., (2006). Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Yakıt Olarak Kullanılması ve Performansa Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Dunn, S., (2002). “Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 27 (3): 235-264.
- [3] Palmer, D., (1997). “Hydrogen in the Universe”, NASA.
- [4] Habitat için Gençlik, Temiz Enerji Yayınları Geçmişten Bugüne Enerji Kullanımı, http://www.habitaticingenclik.org.tr/dl/yayinlar/enerji/G_Bugune.pdf, 7 Mayıs 2010.
- [5] Ültanır, M.Ö., (1997). “Temiz Enerji Olarak Hidrojen Yakıtı ve Teknolojisi”, Türkiye 7. Enerji Kongresi, 1997, Ankara.
- [6] Soruşbay, C. ve Arslan, E., (1988). “Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motorlarda Yanma Performansı”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 29 (339).
- [7] UTC Power, Fuel Cell Technology, http://www.utcfuelcells.com/fs/com/bin/fs_com_Page/0,11491,0103,00.html, 9 Mayıs 2010.
- [8] Bromberg, L., (2001). “Emissions Reductions Using Hydrogen From Plasmatron Fuel Converters”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 26: 1115-1121.
- [9] Uykur, C., (2001). “Effects of Addition of Electrolysis Products on Methane/Air Premixed Laminar Combustion”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 26: 265-273.
- [10] Andrea, T.D., (2003). “Investigating Combustion Enhancement and Emissions Reduction with the Addition of $2H_2 + O_2$ to a SI Engine”, SAE Paper, 2003320011.
- [11] Andrea, T.D., (2004). “The Addition of Hydrogen to a Gasoline-Fuelled SI Engine”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 29: 1541-1552.
- [12] Dülger, Z. ve Özçelik, K., (2000). “Fuel Economy Improvement by On Board Electrolytic Hydrogen Production”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 25 (9): 895-897.
- [13] Brown, Y., (1978). “Arc-Assisted Oxy/Hydrogen Welding”, U.S. Patent No. 4.081.656, 28 Mart 1978.
- [14] Hung-Kuk, O., (1999). “Some Comments on Implosion and Brown Gas”, *Journal of Materials Processing Tech.*, (95): 8-9.

- [15] Finegold, J.G., Lynch, F.E., Baker, N.R., Takahashi, R. ve Bush, A.F., (1973). "The UCLA Hydrogen Car: Design, Construction and Performance", SAE Paper, No.73 0507.
- [16] Van Vorst, W.D. ve Finegold, J.B., (1975). "Automotive Hydrogen Engines and Onboard Storage Methods", Hydrogen Energy Fundamentals.
- [17] Kahraman, N., Akansu, S.O. ve Albayrak, B., (2007). "İçten Yanmalı Motorlarda Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen Kullanılması", Mühendis ve Makina Dergisi, 48 (569): 9-15.
- [18] Oral, E. ve Çelik, V., (2005). "Hidrojen Yakıtlı Motor Teknolojisi ", Mühendis ve Makine Dergisi, 46 (540): 30-40.
- [19] Hoffman, T. ve Johnson, B., (1981). Energy in a Finite World, Cilt: 2, Ballinger Yayınları, Cambridge.
- [20] Arslan, E., Ergenekon, M. ve Soruşbay, C., (1991). Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Yakıt Olarak Kullanımı, Proje, İ.T.Ü. Makine Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı, İstanbul.
- [21] Combustion Research Facility, Internal Combustion Engines, <http://www.ca.sandia.gov/crf/research/combustionEngines/PFI.php>, 16 Haziran 2010.
- [22] Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F., (2003). "Yakıt Pilleri", Tesisat Mühendisliği Dergisi, 26.
- [23] Wall, J., (2010). "Effect of Hydrogen Enriched Hydrocarbon Combustion Emissions and Performance", 17th Annual NPA Conference, 23-26 Haziran 2010, Cal State Long Beach.
- [24] Changwei, J. ve Shuofeng, W., (2009). "Effect of Hydrogen Addition On Combustion and Emissions Performance of a Spark Ignition Gasoline Engine at Lean Conditions".
- [25] Hari Ganesh, R., Subramanian, V., Balasubramanian, V., Mallikarjuna, J.M., Ramesh, A. ve Sharma, R.P., (2007). "Hydrogen Fueled Spark Ignition Engine with Electronically Controlled Manifold Injection: An Experimental Study".
- [26] Al-Baghdadi, M.A.S., (2000). "Performance Study of a Four-Stroke Spark Ignition Engine Working with Both of Hydrogen and Ethyl Alcohol as Supplementary Fuel".
- [27] Mohammadi, A., Shioji, M., Nakai, Y., Ishikura, W. ve Tabo, E., (2006). "Performance and Combustion Characteristics of a Direct Injection SI Hydrogen Engine".
- [28] Yüksel, F. ve Ceviz, M.A., (2002). "Thermal Balance of a Four Stroke SI Engine Operating on Hydrogen as a Supplementary Fuel".
- [29] Antunes, G., Mikalsen, R. ve Roskilly, A.P., (2009). "An Experimental Study of a Direct Injection Compression Ignition Hydrogen Engine".
- [30] Sierens, R. ve Verhelst, S., (2001). "Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engines".
- [31] Salimi, F., Shamekhi, A.H. ve Pourkhesalian, A.M., (2009). "Role of Mixture Richness, Spark and Valve Timing in Hydrogen-Fuelled Engine Performance and Emission".
- [32] Porpatham, E., Ramesh, A. ve Nagalingam, B., (2006). "Effect of Hydrogen Addition on the Performance of a Biogas Fuelled Spark Ignition Engine".

- [33] Karagöz, Y. ve Sandalcı T., (2010). “Ek Yakıt Olarak Hidrojenin Benzinli Motorlarda Kullanılmasının Performans ve Emisyonlara Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması”.
- [34] Levene, J., Kroposki, B. ve Sverdrup, G., (2006). “Wind Energy and Production of Hydrogen and Electricity — Opportunities for Renewable Hydrogen”, Renewable Energy and Fuels Technical Conference, 10-12 Nisan 2006, Nevada.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Erman GENÇ
Doğum Tarihi ve Yeri : 23.04.1987
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca
E-posta : ermangenc@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	
Lisans	Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lisans	Makine Müh.	Kocaeli Üniversitesi	Yatay Geçiş
Lise	Fen Bilimleri	Maltepe Kadir Has Anadolu Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011	Ford Otomotiv Sanayi A.Ş.	Ürün Geliştirme ve Dizayn Müh.

YAYINLARI

Proje

1. 4 Silindirli 4 Stroklu Bir İçten Yanmalı Otto Motorunun Tasarımı (Grup Çalışması)

2. Bir ATV Aracının Süspansiyon Sisteminin Tasarımı (Grup Çalışması)
3. MSC.ADAMS Yazılım Paketinin Otomotiv Sistemlerine Uygulanması ve MSC.ADAMS/Car Modülü Kullanılarak Araç Simülasyon Temellerinin Oluşturulması (Grup Çalışması)
4. Taşıt Gürültü ve Titreşim Ölçümünde Kullanılan Donanımlar ve LABVIEW Yazılım Paketi Kullanılarak Gürültü ve Titreşim Sinyallerinin Analizi (Grup Çalışması) (Mak. Müh. Lisans Bitirme Tezi)
5. Hidrojen Yakıtı ve Hidrojen Yakıtı Kullanan İçten Yanmalı Motorlar
6. 4 Silindirli 4 Stoklu Bir İçten Yanmalı Diesel Motorun Tasarımı (Grup Çalışması)
7. MATLAB Yazılım Paketi Kullanılarak 4 Stoklu Bir İçten Yanmalı Diesel Motorun Termodinamik Analizi ve Modellenmesi (Grup Çalışması) (Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh. Lisans Bitirme Tezi)